



Tesis Doctoral

**“Creación de herramientas aerobiológicas informativas
para la población a partir del estudio de plantas
ornamentales y gradientes locales y regionales de polen”**

Raúl Pecero Casimiro

Programa de doctorado

Modelización y Experimentación en Ciencias y Tecnología

2020

Preámbulo



Tesis Doctoral

“Creación de herramientas aerobiológicas informativas para la población a partir del estudio de plantas ornamentales y gradientes locales y regionales de polen”

Raúl Pecero Casimiro

Programa de doctorado: Modelización y Experimentación en Ciencias y Tecnología

Conformidad de los directores

Fdo. Dr. Santiago Fernández Rodríguez

Fdo. Dr. Jose María Maya Manzano

La conformidad de los directores de la tesis consta en el original en papel de esta Tesis Doctoral

2020

Informe razonado de los Directores de la Tesis Doctoral

Los Doctores Santiago Fernández Rodríguez, profesor titular de universidad de la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura y José María Maya Manzano, investigador del centro de Alergia y Medio Ambiente (ZAUM) de la Universidad Técnica de Munich (TUM), en calidad de directores, informan:

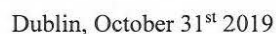
que esta Tesis Doctoral se ha realizado bajo nuestra dirección en el Área de Botánica del Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de La Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura, siendo realizada por el doctorando Raúl Pecero Casimiro. Dicho trabajo de investigación con base científica de Botánica y Ecología aplicada en Aerobiología aporta herramientas novedosas para el conocimiento científico botánico relacionado con la población que presenta problemas de alergias, así como a médicos y especialistas alergólogos en el ámbito sanitario y a gestores urbanísticos de infraestructura verde en ingeniería. Los resultados y conclusiones mostrados han sido publicados en revistas científicas indexadas en Journal Citation Reports acorde a los requisitos necesarios para el programa de Doctorado Modelización y Experimentación en Ciencia y Tecnología de la Universidad de Extremadura en la modalidad de Tesis por compendio de artículos. Por tanto, consideramos que se reúnen los requisitos necesarios para ser presentada a la comisión de esta Universidad para su exposición y defensa.

Y para que así conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, se firma la presente en Badajoz, el día 6 de noviembre de 2020.

Fdo.: Dr. Santiago Fernández Rodríguez

Fdo.: Dr. José María Maya Manzano

La firma de los directores de la tesis consta en el original en papel de esta Tesis Doctoral



The undersigned, **Dr. David O'Connor** (lecturer) and **Dr. José María Maya Manzano** (Postdoctoral research Fellow), both working at Technological University of Dublin, **CERTIFICATE** that **D. Raúl Pecero Casimiro**, of the University of Extremadura has acted since **September, 30th 2019** until **October, 31st 2019** a research stay framed in the development of his doctoral thesis in the **School of Chemical and Pharmaceutical Sciences (TU Dublin)**.

During the stay, he has collaborated in numerous training activities and research works, some of which are: activities integrated in the POMMEL projects (Pollen monitoring and modelling), participation in the FONTANA project (Network and fungus monitoring algorithm) and in addition, it has deepened in the learning of models of atmospheric dispersion and mapping of species with geographic information systems. These activities take place in the memory of the stay.

The use of Ph.D. student, his participation and collaboration in the activities and his presentation has been positive, with a **qualification** of (apt/not apt) **apt**.

And for the record, we both signed this in Dublin, October 31^s



BV of the researchers responsible for the stay

Las firmas originales de los responsables de la estancia de investigación se encuentran en el original en papel de la presente Tesis Doctoral

Fdo: David O'Connor

Fdo.: Jose María Maya Manzano



UNIVERSIDADE
DE ÉVORA



Instituto de Ciências da Terra
Institute of Earth Sciences

Évora, March 3rd 2020

Research stay certificate

The undersigned, **Professor Dr. Célia M. Antunes** (Assistant Professor), working at University of Évora, **CERTIFICATE** that **D. Raúl Pecero Casimiro**, of the University of Extremadura has acted since **January, 2nd 2020** until **March, 3rd 2020** a research stay framed in the development of his doctoral thesis in the group “Atmospheric Sciences, Water and Climate” at the **Institute of Earth Sciences of University of Évora**, located at the Department of Chemistry, School of Sciences and Technology, **University of Évora**.

During the stay, he has collaborated in numerous training activities and research works, some of which are: location and mapping of species with geographic information systems, calculation of the level of allergenicity, calculation of aerobiological risk, sampling of aerobiological particles and estimation of the pollen concentration for some species. These activities take place in the memory of the stay.

The use of Ph.D. student, his participation and collaboration in the activities and his presentation has been positive, with a **qualification** of (apt/not apt) **APT**.

And for the record, I sign this in Évora, March 3rd 2020.

BV of the researcher responsible for the stay

La firma original del responsable de la estancia de investigación se encuentra en el original en papel de la presente Tesis Doctoral

Fdo: Célia M. Antunes

Informe sobre aportaciones derivadas de la Tesis Doctoral y el factor de impacto de las revistas científicas (Journal Citation Reports)

Publicaciones en revistas científicas (Capítulos de la Tesis Doctoral)

1. Pecero-Casimiro R., Maya-Manzano J.M., Fernández-Rodríguez S., Tormo-Molina R., Silva-Palacios I., Monroy-Colín A. & Gonzalo-Garijo A. Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain). *Aerobiología* (2020). <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09667-3>. Springer, Holanda, 2020. 2.708 (JCR 2019). *Biology* 31/93 2º cuartil.

2. Pecero-Casimiro R., Fernández-Rodríguez S., Monroy-Colin A., Silva-Palacios I., Cortés-Pérez J.P., Gonzalo-Garijo A. & Maya-Manzano J.M. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees. *Science of The Total Environment*. 693 (2019) 133576. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.382. Editorial. Elsevier Science BV, Holanda, 2019, 1618-8667. 6.551 (JCR 2019). *Environmental Sciences* 22/265 1º cuartil 1^{er} decil.

3. Pecero-Casimiro R., Fernández-Rodríguez S., Tormo-Molina R., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo Á., Monroy-Colín A., Coloma J.F. & Maya-Manzano J.M. Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology. *Remote Sens.* 2020, 12, 1562. doi.org/10.3390/rs12101562. Editorial. MDPI, Switzerland, 2019. 4.509 (JCR 2019). *Remote Sensing* 9/30 2º cuartil.

Publicaciones en revistas científicas (Otras publicaciones derivadas)

Fernández-Rodríguez S., Maya-Manzano J.M., Monroy-Colín A., **Pecero-Casimiro R.**, Buters J. & Oteros J. Understanding hourly patterns of Olea pollen concentrations as tool for the environmental impact assessment. Science of The Total Environment 736 (2020) 139363. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139363. Editorial. Elsevier Science BV, Holanda, 2019, 1618-8667. 6.551 (JCR 2019). Environmental Sciences 22/265 1º cuartil 1^{er} decil.

González-Naharro R., Quirós E., Fernández-Rodríguez S., Silva-Palacios I., Maya-Manzano J.M., Tormo-Molina R., **Pecero-Casimiro R.**, Monroy-Colín A. & Gonzalo-Garijo Á. Relationship of NDVI and oak (Quercus) pollen including a predictive model in the SW Mediterranean region. ScienceTotal. Environment.2019; 676:407-419. Editorial. Elsevier Science BV, Holanda, 2019, 1618-8667. 5.589 (JCR 2018). Environmental Sciences 27/251 1º cuartil 1^{er} tercio.

Publicaciones en capítulos de libros (Otras publicaciones derivadas)

González-Naharro R., Quirós E., Fernández-Rodríguez S., Silva-Palacios I., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M., Monroy-Colín A., **Pecero-Casimiro R.** & Gonzalo-Garijo A. (2018) Spearman Correlation between the NDVI and *Quercus* Airborne Pollen in the SW of the Iberian Peninsula. doi:10.3390/proceedings2201519

Comunicaciones presentadas en congresos nacionales e internacionales

Pecero Casimiro R., Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S., Tormo Molina R., Monroy Colín A., Silva Palacios I. & Fernández Ramos M. Herramientas aerobiológicas de información. III Congresso Luso-Extremadurense de Ciências e Tecnologia. Évora (Portugal) (2019).

Pecero Casimiro R., Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S., Tormo Molina R., Monroy Colín A., Silva Palacios I., Hidalgo Barquero J.J., Fernández Ramos M., Martínez Corrales M., Sánchez Fernández M., Aguilar Mateos P.L. & Giraldo Pavon F. Cambios en la tendencia de polen de Badajoz. III Congresso Luso-Extremadurense de Ciências e Tecnologia. Évora (Portugal) (2019).

Hidalgo Barquero J.J., Silva Palacios I., Fernández Ramos M., Barriga Granado C., Nieto rodríguez R., Pinilla Gil E., **Pecero Casimiro R.**, Monroy Colín A., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., & Tormo Molina R. Análisis comparativo de dos estaciones aerobiológicas en la ciudad de Badajoz. III Congresso Luso-Extremadurense de Ciências e Tecnologia. Évora (Portugal) (2019).

Silva Palacios I., **Pecero Casimiro R.**, Monroy Colín A., Hidalgo Barquero J.J., Fernández Ramos M., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., Pinilla Gil E. & Tormo Molina R. Relación entre el polvo atmosférico de origen africano y el polen aerovagante en Extremadura. III Congresso Luso-Extremadurense de Ciências e Tecnologia. Évora (Portugal) (2019).

Pecero Casimiro R., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Silva Palacios I., Gonzalo Garijo A. Monroy Colín A & J., Maya Manzano J.M. AIROT applied for the creation of urban risk maps for Cupressaceae family. Mediterranean Palynological Societies Symposium. Bordeaux (Francia) (2019).

Pecero Casimiro R., Fernández Rodríguez S., Morillo Barragán J., Guerrero Ramírez J., Maya Manzano J.M., Tormo Molina R., Monroy Colín A., Silva Palacios I. & Gonzalo Garijo A. Relationship between NDVI using Sentinel and Olea airborne pollen in SW of the Iberian Peninsula. Mediterranean Palynological Societies Symposium. Bordeaux (Francia) (2019).

Fernández Rodríguez S., Quevedo Martínez E., Cortés Pérez J.P., Morillo Barragán J., Maya Manzano J.M., Tormo Molina R., Silva Palacios I., **Pecero Casimiro R.** & Monroy Colín A. Light Detection and Ranging on Building Modelling Information as tool for urban planning by green infrastructure of Cupressaceae spp. Mediterranean Palynological Societies Symposium. Bordeaux (Francia) (2019).

Fernández Rodríguez S., Guerrero Ramírez J., Morillo Barragán J., Tormo Molina R., Silva Palacios I., Gonzalo Garijo A., **Pecero Casimiro R.**, Monroy Colín A., Maya Manzano J.M., & Durán Barroso P. Mobile application of airborne particles and potential sources in Extremadura network of Aerobiology. Mediterranean Palynological Societies Symposium. Bordeaux (Francia) (2019).

Monroy Colín A., Silva Palacios I., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., Gonzalo Garijo A. & **Pecero Casimiro R.** Airborne pollen records, phenology of *Quercus rotundifolia*. Mediterranean Palynological Societies Symposium 2019. Bordeaux (Francia).

Monroy Colín A., Silva Palacios I., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., Gonzalo Garijo A. & **Pecero Casimiro R.** Airborne pollen records, phenology and geolocation of plane tree (*Platanus* sp.). Mediterranean Palynological Societies Symposium. Bordeaux (Francia) (2019).

Pecero Casimiro R., Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S, Silva-Palacios I, Gonzalo Garijo Á, & Monroy Colín A. Mapas de riesgo urbano: herramienta aerobiológica informativa para la población. XV Congreso Español y V Congreso Iberoamericano de Salud Ambiental, y la II Jornada de la Asociación Española de Aerobiología. Valencia (España) (2019).

Pecero Casimiro R., Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S, Silva-Palacios I, Gonzalo Garijo Á, & Monroy Colín A. Calendario aerobiológico actualizado de zonas rurales de Extremadura (Don Benito y Zafra). XV Congreso Español y V Congreso Iberoamericano de Salud Ambiental, y la II Jornada de la Asociación Española de Aerobiología. Valencia (España) (2019).

Maya Manzano J.M., **Pecero Casimiro R.**, Monroy Colín A., Fernández Rodríguez S, Tormo Molina R, Silva Palacios I. & Gonzalo Garijo Á. Aplicaciones de LiDAR y Kriging en entornos urbanos: presentando un nuevo índice aerobiológico (AIROT) y creación de mapas de riesgos urbanos provocados por plátanos de sombra. II Congreso Luso-Extremadurens. Badajoz (España) (2018).

Pecero Casimiro R., Tormo Molina R, Fernández Rodríguez S, Maya Manzano J.M., Monroy Colín A., Silva Palacios I. & Gonzalo Garijo Á. Metodología en la captación de polen y resultados comparativos de la concentración de polen en el aire de Don Benito y Zafra. II Congreso Luso-Extremadurens. Badajoz (España) (2018).

Pecero Casimiro R., Maya Manzano J.M., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Gonzalo Garijo A., Silva Palacios I. & Monroy Colín A. Aerobiological comparison between Zafra

and Don Benito (SW Spain). ICA 2018 – 11th International Congress in Aerobiology. Parma (Italia) (2018).

Silva Palacios I., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., Gonzalo Garijo Á., Monroy Colín A. & **Pecero Casimiro R.** Accumulated temperatura and plane tree airborne pollen presence in the air. ICA 2018 – 11th International Congress in Aerobiology. Parma (Italia) (2018).

Silva Palacios I., Maya Manzano J.M., Tavira Muñoz J., Moreno Corchero A., Fernández Rodríguez S., Monroy Colín A., **Pecero Casimiro R.**, Gonzalo Garijo Á., Cosmes Martín P., Blanco Pérez R.M., Domínguez Noche C., Alvarado Izquierdo M.I., Gómez Nieves E., Fernández Moya L., Sánchez Vega S., Alfonso Sanz J.V., Vaquero Pérez P., Pérez Marín M.L., Muñoz Rodríguez A. & Tormo Molina R. APIN (Annual Pollen Integral) values in the Extremadura (SW Spain) aerobiological network (AeroUEX). ICA 2018 – 11th International Congress in Aerobiology. Parma (Italia) (2018).

Monroy Colín A., Silva Palacios I., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., Gonzalo Garijo A. & **Pecero Casimiro R.** Airborne pollen records and phenology of *Olea europaea*. ICA 2018 – 11th International Congress in Aerobiology. Parma (Italia) (2018).

Monroy Colín A., Tormo Molina R., Silva Palacios I., Fernández Rodríguez S., Maya Manzano J.M., Gonzalo Garijo A. & **Pecero Casimiro R.** Airborne pollen records and phenology of *Cupressaceae*. ICA 2018 – 11th International Congress in Aerobiology. Parma (Italia) (2018).

Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S., Tormo Molina R., Monroy Colín A., **Pecero Casimiro R.**, Silva Palacios I. & Gonzalo Garijo A. Urban risk mapping of ornamental trees using AIROT, a new aerobiological index by applications of LIDAR and KRIGING. A study case over plane trees. ICA 2018 – 11th International Congress in Aerobiology. Parma (Italia) (2018).

González-Naharro R., Quirós E., Fernández Rodríguez S., Silva Palacios I., Tormo Molina R., Maya Manzano J.M., Monroy Colin A., **Pecero Casimiro R.** & Gonzalo Garijo Á. Spearman correlation between the NDVI and Quercus airborne pollen in the SW of Iberian Peninsula. Environment, Green Technology and Engineering International Conference (EGTEIC). Cáceres (España) (2018).

Fernández Rodríguez S., & Gonzalo Garijo Á., Silva Palacios I., Tormo Molina R., Maya Manzano JM., Monroy Colin A., **Pecero Casimiro R.**, & Pérez Calderón R. Pollen sensitization in Badajoz and relationship with airborne pollen presence (SW Spain). VIII SPB Clinical Biochemistry Workshop – Allergy and Environment, Evora (Portugal) (2018).

Gonzalo Garijo A., Monroy Colín A., **Pecero Casimiro R.**, Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S. & Silva Palacios I. Polen aerovagante de la familia *Asteraceae* (*Compositae*) en el aire de Extremadura. XXXI Congreso de la Sociedad Española de Alergología e Inmunología Clínica. Valencia (España) (2018).

Pecero Casimiro R., Fernández Rodríguez S, Monroy Colín A, Maya Manzano J.M., Silva Palacios I., Gonzalo Garijo Á. & Tormo Molina R. Esporas aerovagantes en dos localidades de la provincia de Badajoz (Don Benito y Zafra). 14º Congreso Nacional de Micología. Tarragona (España) (2018).

Pecero Casimiro R., Fernández Rodríguez S, Monroy Colín A, Maya Manzano J.M., Silva Palacios I., Gonzalo Garijo Á. & Tormo Molina R. Valores de concentración de esporas aerovagantes de *Alternaria* en Zafra (Badajoz). 14º Congreso Nacional de Micología. Tarragona (España) (2018).

Pecero Casimiro R. & Monroy Colin A. Captación de polen y esporas. Procesado de muestras. IV Congreso Multidisciplinar de Jóvenes Investigadores de Extremadura. Badajoz (España) (2018).

Monroy Colín A. & **Pecero Casimiro R.** Aerobiología: granos de polen y esporas de hongos en el aire. IV Congreso Multidisciplinar de Jóvenes Investigadores de Extremadura. Badajoz (España) (2018).

Agradecimientos

Karl Heinrich Marx dijo “Leer libros no te hace mejor, saber interpretarlos sí”. Lo mismo ocurre con las señales y caminos que te muestra la vida y que, con tu intuición y un poco de fortuna, debes aprender a descifrar y seguir. Mi vida está llena de estas y me han traído de momento hasta aquí. Aún recuerdo aquel junio de 2011 cuando el teléfono suena y encuentro la posibilidad de colaborar en un grupo de investigación de la Universidad de Extremadura, AeroUEX. Compañeros y amigos me decían que estaba “loco” por emprender ese camino el último año de carrera, pero una vez más ahí estaba la señal.

Aquí encuentro a tres personas fundamentales que, años después, me ofrecieron la posibilidad de hacer mi tesis doctoral y a los que voy a estar eternamente agradecidos. Mi primer tutor, Rafael Tormo Molina, un excelente profesor, investigador, maestro e inmejorable persona, muchas gracias por cada consejo. A uno de mis directores de tesis Santiago Fernández Rodríguez, una persona atenta, trabajadora, audaz y decidido al que nadie ha regalado nada, gracias por tu saber estar. Y a mi otro director de tesis Jose María Maya Manzano, amigo, investigador y uno de los focos principales de mi tesis capaz de alumbrarme con sus conocimientos cuando algo se bloqueaba, muchas gracias. Después, conozco a la que se convirtió en mi segunda tutora, Inmaculada Silva Palacios, una mujer servicial, simpática y transmisora de conocimiento en cada conversación, muchas gracias.

Muchas gracias también a Alejandro, una gran persona y excelente compañero de viaje de congresos con el que hemos vivido buenos momentos y el que me enseñó a identificar los granos de polen y me ayudó en mis inicios en el laboratorio.

Muchas gracias a Marta Fernández, Juanje, Belén y Roberto por las risas, cafés y confidencias, además de aguantar mis días extraños. Agradecer también al resto del grupo de investigación compuesto por Ángela, Remedios, Juan Francisco y Marta. También al compañero de proyecto Juan Morillo y al compañero de espacio de trabajo Pepe. También a Paco, el hombre del último despacho del área con el que siempre es un verdadero placer compartir charlas.

A los compañeros del Área de Botánica, haciendo especial mención a su catedrática Ana Ortega Olivencia por su obsequio y su dedicatoria con sus buenos deseos, y al Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de La Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura por su trato durante este tiempo y por su ayuda en los momentos que la necesité.

También a David O’Connor y su equipo por darme la oportunidad de trabajar con su grupo de investigación en School of Chemical and Pharmaceutical Sciences de la Technological University Dublin (TU Dublin). Por otra parte, muchas gracias a Célia M. Antunes y a su equipo Ana Costa y

Ana Galveias y al personal del laboratorio Deolinda y Esperança por su acogedor recibimiento y un trato excelente hacia mí en el tiempo que estuve de estancia en el Grupo de Atmosfera, Instrumentação e Clima (ICT-UÉ) del Instituto de Ciências da Terra de la Universidade de Évora.

Muchas gracias a mi pareja Teresa, una compañera de viaje sensacional, extraordinaria, que siempre me animó y apoyó a realizar no solo la tesis, sino también las estancias de investigación en el extranjero asumiendo todo el papel protector sobre nuestra pequeña Sofía con un año de vida.

Inmenso agradecimiento a mis padres, dos personas que nunca lo tuvieron fácil en la vida pero que demostraron que los baches se pasan juntos, en familia y siempre mirando hacia adelante por muchas que fuesen las piedras del camino. Ellos que nunca dudaron en darme lo mejor, aunque eso supusiera quitárselo a ellos. La economía familiar podría no ser del todo buena en algunos momentos y probablemente de pequeño nunca vestí ropa de marca, pero fui el primero en tener ordenador, internet, enciclopedia interactiva y horas de deberes y trabajos junto a mí. Mi madre tuvo la suerte de poder tener unos estudios avanzados y en ella siempre encontré una ayuda constante en cada suma o resta e incluso en el inglés, cuando ella había estudiado francés. Sin embargo, mi padre nunca tuvo la suerte de poder estudiar y salió del colegio con 10 años, pero eso sí, horas pasamos bastantes en aquellos trabajos de Ciencias Sociales de 1º de la ESO. Vosotros habéis sido mi mayor apoyo y ejemplo. También a mis hermanos Francisco y María, para los que siempre intenté ser el mejor ejemplo al que seguir.

Al resto de mi familia y amigos que siempre estuvieron ahí preocupándose por este periodo de aprendizaje educativo, profesional y personal.

Pero los agradecimientos no pueden terminar sin recordar a dos personas fundamentales en mis anteriores etapas educativas. La primera llegó en primaria, la “señorita Marielo”. Una mujer a la que debo parte de mi éxito estudiantil y personal. Una maestra dentro del aula y fuera, pues fue ella la que supo entender aquella etapa de mi vida y aconsejar a mis padres de la mejor manera posible. La segunda llegó en secundaria, esa etapa frenética entre hormonas y decisiones que ella entendía como nadie en el alumno. Ella es Estrella, una persona alegre, valiente, profesional y amiga, porque en eso se convirtió. Hoy eres, como tu propio nombre indica, una estrella más en el cielo.

Gracias también a la Junta de Extremadura por la financiación del contrato PCI a través del Proyecto IB16029.

Por último, gracias abuela por ser el faro que me ilumina en las noches, siempre en mi corazón.

A mi familia

“Cuando ya no somos capaces de cambiar una situación, nos encontramos ante el desafío de cambiarnos a nosotros mismos”

(Viktor E. Frankl)

Índice

PREÁMBULO	3
AGRADECIMIENTOS.....	13
ÍNDICE.....	17
1. ABSTRACT	20
1.1. Graphical abstract.....	20
1.2. Abstract.....	20
1.3. Resumen.....	22
2. INTRODUCCIÓN.....	26
2.1. La Aerobiología.....	26
2.1.1. Aplicaciones de la Aerobiología.....	27
2.2. Contextualización y justificación de la Tesis Doctoral.....	28
2.3. Aerobiología y Salud	33
2.3.1. Factores influyentes en la alergenidad y en el riesgo aerobiológico en ambientes urbanos	35
2.3.2. Granos de polen con potencial alergénico	38
2.3.3. Herramientas de información aerobiológica	43
2.4. Aerobiología y nuevas tecnologías	47
2.4.1. LiDAR	47
2.4.2. Sistemas de Información Geográficos (SIG).....	49
2.4.3. Estadística aplicada a la Aerobiología	50
2.5. Hipótesis de la Tesis Doctoral.....	51
3. OBJETIVOS	54
3.1. Capítulo I.....	54
3.2. Capítulo II.....	54
3.3. Capítulo III.....	55
4. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS GENERALES	58
4.1. Áreas de estudio.....	58

4.2. Inventario ambiental urbano.....	64
4.3. Estudio aerobiológico.....	65
4.3. Resúmenes gráficos de la metodología de los Capítulos	66
4.3.1. Capítulo I.....	66
4.3.2. Capítulo II.....	66
4.3.3. Capítulo III	67
5. RESULTADOS	69
5.1. Resumen gráfico	70
5.2. Resumen.....	71
5.3. Capítulo I: Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain).	74
5.4. Capítulo II: Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees.....	93
5.5. Capítulo III: Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology.....	106
6. DISCUSIÓN GENERAL.....	126
7. CONCLUSIONS.....	140
7.1. Conclusiones	143
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
9. ANEXO	172
9.1. Índice de figuras.....	172
9.2. Índice de Tablas.....	173
9.3. Material suplementario.....	174
Capítulo II.....	174
Capítulo III.....	181

1

RESUMEN



1. Abstract

1.1. Graphical abstract

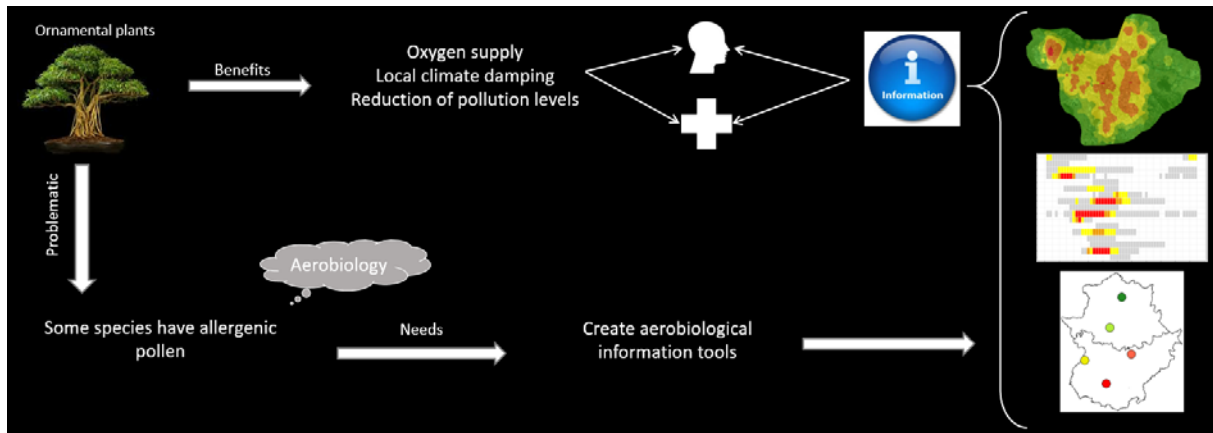


Figure 1. Graphical abstract of the Doctoral Thesis.

1.2. Abstract

Plants provide innumerable benefits for human beings. They produce food, biofuel and a big amount of resources for industry, alimentary and farmaceutical industries. Moreover, they help to mitigate heat and particulate pollution levels, creating biodiversity and improving the air quality among many other functions. In this sense, urban forests and green spaces have become indispensable spaces in cities for urban sustainability, as well as plants found in peri-urban areas, whether as natural vegetation or crops. However, air quality can decrease as a consequence of the release of pollen grains by plants, producing episodes of massive emission into the atmosphere with consequences on human health. In this situation, Aerobiology has recently developed important technological advances in tools that help providing a better visualization about information on pollination predictions, allergenicity calculations, pollen concentrations, aerobiological risks, etc.

This Doctoral Thesis aims to develop aerobiological information tools that allow people with pollen allergies, as well as health personnel, to be informed in the planning and treatment of these diseases. Furthermore, they can work as informative tools for professionals in the green infrastructure planning sector. To achieve these goals, the pollen spectrum of Extremadura for the cities of Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra will be analyzed. The slopes and other geographical characteristics of these cities will also be taken into account, which are factors that directly influence the dispersion of pollen and for which the LiDAR (Light Detection and Ranging) technique will be used. LiDAR data from the five urban areas have been used to create the DEM and DSM (Digital Elevation Model and Digital Surface Model) which are necessary for further analysis. GIS (Geographic Information Systems) software was used to map the points for each city

and to create risk maps by applying Kriging technique. Statistical analysis software R was also used to obtain the characteristics of the MPS (Main Pollen Season) (start date, peak date, end date and length) to analyze and develop regional pollen gradients and to create pollen calendars in each city.

An aerobiological index to create risk maps for ornamental trees is proposed called AIROT (Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees) and the establishment of pollen exposure risk areas by studying parameters such as street width, height of buildings, location, geographic features of cities, maturity of individuals, density and pollen production. In addition, regional gradient maps and pollen calendars that show information on the most abundant pollen types, the main dates of pollination, pollen concentrations, etc, were created.

In Extremadura, around 35-40 different types of pollen are frequently identified, being the most abundant according to their concentration; *Quercus*, Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, *Platanus*, *Plantago* and *Pinus*. Among these pollen types, Cupressaceae and *Platanus* are the most widely used as ornamental taxa in the five cities studied and which are considered highly allergenic, being this the reason why they were used for the creation of the AIROT index and the development of aerobiological risk maps. Specifically, we worked with the genus *Platanus* sp. and some species of the Cupressaceae family such as *Cupressus arizonica*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressocyparis leylandii* and *Platycladus orientalis*, in order to identify aerobiological risks that serve as information for allergy sufferers, health personnel and the general population.

As for the accumulation of pollen, the dates when the greatest accumulation occurs in Badajoz and Cáceres are from mid-April to the end of May, in Don Benito from mid-March to the beginning of June, in Plasencia from mid-April to early June and in Zafra from mid-April to June 10. In addition, it could be affirmed that in Extremadura the start date and the peak date are reached earlier in the cities of the south of the region, being also in these cities the duration of the largest pollen season. The differences found amongst cities may be due to the variety of urban species and their management (pruning and irrigation), the influence of peri-urban landscapes, medium and long distance transport and climatic conditions.

In short, the AIROT index can be a useful tool for mapping possible biological risks in cities. Also allow to establish healthy itineraries and maps of tourist and gastronomic interest that serve as information to allergy patients to plan about places to visit and where to move within the cities. They are also valuable for allergists, architects and urban planners, tourists, city planning councilors and restaurant owners to structure vegetation, as well as to plan tourism according to the risks of the environmental environment and to reduce the aerobiological risk of certain areas. In addition, the representation and geolocation of pollen calendars using geographic gradients

provides information in a simple, fast and visual way and it can be of great interest also for allergy patients and health professionals.

1.3. Resumen

Las plantas aportan innumerables beneficios para los seres humanos, produciendo alimentos y biocombustibles, generando gran cantidad de materias primas que son utilizadas en industria, incluyendo la industria alimentaria y farmacéutica. Además, ayudan a mitigar el efecto “isla de calor urbano” y la contaminación de partículas, creando biodiversidad y mejorando la calidad del aire entre otras muchas funciones. En este sentido, los bosques urbanos y los espacios verdes se han convertido en espacios indispensables en las ciudades para la sostenibilidad urbana, al igual que también lo son las plantas que se encuentran en zonas periurbanas, ya sea como vegetación natural o cultivos. Sin embargo, la calidad del aire puede disminuir como consecuencia de la liberación de granos de polen por las plantas produciendo episodios de emisión masiva a la atmósfera con consecuencias sobre la salud de las personas. Ante esta situación, en los últimos años la Aerobiología ha desarrollado importantes avances tecnológicos en herramientas que ayudan a proporcionar información para visualizar mejor las predicciones de polinización, cálculos de alergenicidad, concentraciones polínicas, riesgos aerobiológicos, etc.

La presente Tesis Doctoral pretende desarrollar herramientas de información aerobiológica que permitan informar a las personas que padecen alergia al polen, así como al personal sanitario en la planificación y tratamiento de la enfermedad. Además, pueden servir como herramienta informativa para profesionales del sector de la planificación de infraestructuras verdes tanto privadas como de ámbito público. Para ello, se analizará el espectro de polen de Extremadura para las ciudades de Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra. También se tendrán en cuenta las pendientes y otras características geográficas de estas ciudades que son factores que influyen directamente en la dispersión del polen y para lo que se utilizará la técnica LiDAR (Light Detection and Ranging). Los datos LiDAR de las cinco áreas urbanas se han utilizado para crear el MDE y el MDS (Modelo Digital de Elevación y Modelo Digital de Superficie, respectivamente) los cuales son necesarios para realizar análisis adicionales. Se utilizó un software SIG (Sistemas de Información Geográfica) para mapear los puntos para cada ciudad y para crear mapas de riesgo por técnica de Kriging. También se utilizó el software de análisis estadístico R para obtener las características del periodo de polinización principal (PPP), así como su fecha de inicio, fecha pico, fecha de finalización y duración, para analizar y desarrollar los gradientes regionales de polen y crear calendarios polínicos en cada una de las ciudades.

Se propone un índice aerobiológico para crear mapas de riesgo para árboles ornamentales llamado AIROT (Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees) y el

establecimiento de áreas de riesgo de exposición al polen que incluye parámetros como el ancho de las calles, la altura de los edificios, la ubicación, características geográficas de las ciudades, la madurez de los individuos, su densidad y la producción de polen. Además de mapas de gradientes regionales y calendarios polínicos que muestren información sobre los tipos polínicos más abundantes, las fechas principales de la polinización, concentraciones polínicas, etc.

En Extremadura en torno a 35-40 tipos diferentes de polen se identifican con frecuencia, siendo los más abundantes; *Quercus*, Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, *Platanus*, *Plantago* y *Pinus*. De estos tipos polínicos, los más utilizados como taxones ornamentales en las cinco ciudades estudiadas y los cuales son considerados de elevada alergenicidad son Cupressaceae y *Platanus*, por lo que fueron utilizados para la creación del índice AIROT y el desarrollo de los mapas de riesgo aerobiológico. En concreto se estudió el género *Platanus* sp. y algunas especies de la familia Cupressaceae como *Cupressus arizonica*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressocyparis leylandii* y *Platycladus orientalis*, con el fin de identificar riesgos aerobiológicos que sirvan de información a personas alérgicas, a personal sanitario y a la población en general.

En cuanto a la acumulación de polen, las fechas en las que se produce mayor acumulación en Badajoz y Cáceres es desde mediados de abril hasta finales de mayo, en Don Benito desde mediados de marzo hasta principios de junio, en Plasencia desde mediados de abril hasta principios de junio y en Zafra desde mediados de abril hasta el 10 de junio. Además, se podría afirmar que en Extremadura la fecha de inicio y la fecha pico se alcanza antes en las ciudades del sur de la región, siendo también en estas ciudades la duración de la temporada de polen más larga. Las diferencias mostradas entre ciudades pueden deberse a la variedad de especies urbanas y su manejo (poda y riego), a la influencia de paisajes periurbanos, al transporte a media y larga distancia, así como al clima.

En definitiva, el índice AIROT puede ser una herramienta útil para mapear posibles riesgos biológicos en ciudades y establecer a partir de estos mapas itinerarios saludables y mapas de interés turísticos y gastronómicos. Esto sirve para dar información a los pacientes con alergia, lo que les permitirá planificar mejor los lugares a visitar y por donde moverse con menos riesgo potencial dentro de las ciudades. También son valiosos para alergólogos, arquitectos y urbanistas, turistas, concejales de planificación urbana y dueños de restaurantes para estructurar la vegetación, así como para planificar el turismo de acuerdo con los riesgos del entorno ambiental y para reducir el riesgo aerobiológico de ciertas áreas. Además, la representación y geolocalización de calendarios de polen utilizando gradientes geográficos proporciona información de una manera simple, rápida y visual y puede ser de gran interés también para pacientes alérgicos y profesionales de la salud.

2

INTRODUCCIÓN



2. Introducción

2.1. La Aerobiología

El término Aerobiología fue introducido en 1930 por Meier, fitopatólogo estadounidense interesado en estudiar la dispersión de los organismos a través del aire. La acepción fue adoptada para referirse a la disciplina que se ocupa del estudio de los organismos vivos aerotransportados, su diversidad, modos de vida, dependencia y, al mismo tiempo, repercusión en el entorno. Desde entonces son varias las definiciones que han ido surgiendo, siendo una de las primeras definiciones la de Gregory (1973), que indicó que la Aerobiología se basaba en “el estudio de los microorganismos transportados pasivamente por el viento, así como de su identificación, comportamiento y movimientos”. Otros como Edmonds et al. (1973) la definieron como “la Ecología de la atmósfera” y Pathirane (1975) definió la Aerobiología como “una ciencia que se encarga de las partículas aerovagantes y del estudio de la liberación, retención, dispersión y deposición e incidencia de estas”. Después fue Hirst (1991) quien definió la Aerobiología como la “disciplina que se ocupa del transporte de organismos y material biológico a través de la atmósfera”. Años más tarde se afirmó que “la Aerobiología es una ciencia que estudia las partículas atmosféricas de origen biológico, su dispersión y su impacto sobre el ambiente y los organismos” (Frenguelli, 1998).

En España los comienzos de la disciplina están ligados a Facultades como la de Medicina, Farmacia y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, siendo la primera publicación relacionada con el polen la del médico Jiménez Díaz (1932). Desde 1940 se comienza a prestar mayor atención a los estudios sobre el polen y esporas atmosféricas comenzando a desarrollarse trabajos polínicos en Sanlúcar de Barrameda (Cádiz) (Barrios, 1942), en Santiago de Compostela (Vieitez, 1945), en Granada (Muñoz-Medina, 1949) y en Barcelona (Montserrat, 1951; 1953), entre otras ciudades. La creación de la Sociedad Española de Alergia (SEA) en 1948 fue otro de los estímulos para la Aerobiología, junto con el primer Congreso Nacional de Alergia en Madrid (1949). No es hasta la década de 1970 cuando los estudios aerobiológicos toman una mayor dimensión teniendo en cuenta por supuesto las alergias, pero también comienzan a integrarse como parte de estudios relacionados con las plantas, mediante trabajos como los de Izco et al. (1972) quienes publican Flora alérgica de España. Candau et al. (1981) utilizaron por primera vez, en el año 1975, el captador Burkard para muestrear la atmósfera de Sevilla y Subiza (1980) en Madrid. En 1978 se constituyó la Asociación de Palinólogos de Lengua Española (APLE) con la finalidad de fomentar los estudios científicos en este campo y su divulgación. En 1992 se crea de Red Española de Aerobiología (REA), suponiendo un impulso en cuanto al número de estaciones de muestreo y

análisis del polen atmosférico en España. Otro hecho importante fue la creación de la Asociación Española de Aerobiología (AEA) en 1995, admitida como organización asociada a la International Association for Aerobiology (IAA) en 1998. Recientemente, en noviembre de 2019, ha sido fundada la Sociedad Botánica Española (SEBOT), que está compuesta por cinco sociedades científicas entre las que se encuentran la AEA y la APLE.

2.1.1. Aplicaciones de la Aerobiología

La Aerobiología es una disciplina integrada en la Botánica, encargada fundamentalmente del estudio de granos de polen y esporas de hongos, aunque también se incluyen bacterias, virus, algas, ácaros, líquenes, briófitos, protozoos y fragmentos de vegetales y animales, dentro de un rango de tamaño comprendido entre 0,5 y 50 μm aproximadamente. Los alérgenos generados por estas partículas también se estudian frecuentemente dentro de las publicaciones de Aerobiología. Además, debido a su carácter multidisciplinar interactúa con muchas otras ciencias o ramas de la ciencia, destacando a día de hoy algunas como la Medicina, la Meteorología y la Agronomía entre otras. Entre sus aplicaciones y disciplinas que se encuentran relacionadas con la Aerobiología destacan la Botánica, Ecología, Meteorología, Agricultura, Ciencias Forestales, Micología, Genética, Taxonomía, Sistemática, Alergología, etc (**Fig. 2**).

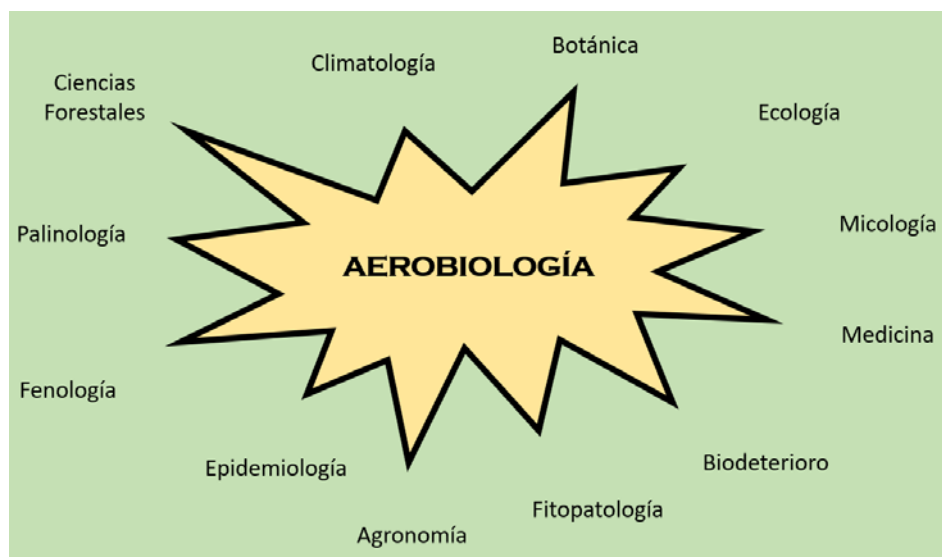


Figura 2. Esquema de algunas de las disciplinas relacionadas con la Aerobiología.

En Botánica tiene elevada importancia para el estudio de la dispersión de genes por el polen, siendo importante para el manejo y la conservación de las especies de plantas en paisajes cada vez más fragmentados y en el ciclo de vida de polinización de las plantas (Belmonte et al., 2008). Las partículas aerobiológicas pueden actuar también como bioindicadores, pudiéndose estudiar la duración e intensidad de los periodos de polinización y dispersión, dando una información muy útil al comparar cambios en los patrones fenológicos de las plantas con el cambio climático (Dorji

et al., 2020). También existen numerosos estudios de distribución de especies con interés en Aerobiología (Skjøth et al., 2008), e incluso puede servir para inventariar y consecuentemente prevenir, mediante la introducción de medidas protectoras, la invasión de especies invasoras, como *Ambrosia artemisiifolia* (Karrer et al., 2015). Por otra parte, el poder reconstruir escenarios y posibles paisajes en el pasado geológico de la tierra también es posible debido a la gran durabilidad que confiere la esporopolenina a la exina de los granos de polen, siendo estos de gran utilidad en estudios paleobotánicos, paleontológicos y paleobiogeográficos (Carrión et al., 2018; Ochando et al., 2020).

La importancia del desarrollo de la Aerobiología en la Agricultura tiene que ver por la capacidad de predicción de las cosechas (Oteros et al., 2014), estudios fenológicos para conocer el ciclo de vida anual de las plantas como floración y fructificación, así como estudios aeromicológicos para conocer y poder combatir los problemas que ocasionan los hongos sobre las plantas (Martínez-Bracero et al., 2019) sobre todo aquellas que tienen interés económico o gastronómico.

La Ecología se define como la parte de la Biología que estudia las relaciones de los seres vivos entre sí y su relación con el medio en el que viven. En muchas ocasiones la Aerobiología también busca establecer relaciones entre los diversos agentes que pueden influir en la polinización de las plantas como por ejemplo la fenología de la floración, la distribución de los árboles de origen, la meteorología y masas de aire (Monroy-Colín et al., 2020), así como los diferentes usos del suelo (Maya-Manzano et al., 2017a). También en zonas urbanas estudiando la influencia de las pendientes de las ciudades y su orografía, construcciones, densidad de árboles y la madurez de los mismos en la dispersión polínica (Capítulos II y III).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016a) el 23% de las muertes en todo el mundo están relacionadas con el ambiente, siendo causadas por infecciones respiratorias, cáncer, enfermedades cardiovasculares, enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y asma, entre otras. Por otra parte, la emisión de partículas como el polen y las esporas de hongos supone uno de los principales problemas alérgicos de la sociedad. Por esto es importante para la medicina conocer las concentraciones polínicas que hay en la atmósfera en cada momento e intentar anticiparse a ello con el objetivo de informar a pacientes y médicos (Katotomichelakis et al., 2015).

2.2. Contextualización y justificación de la Tesis Doctoral

La presente Tesis Doctoral se centra en el desarrollo de herramientas de información aerobiológica que permitan mostrar los resultados de una forma atractiva a las personas que padecen alergia al polen, así como al personal sanitario en la planificación y tratamiento de la enfermedad. También puede servir como herramienta informativa para profesionales del sector de la planificación de infraestructura verde, tanto privadas como de ámbito público. Este tipo de

herramientas ayudan a visualizar zonas de riesgo aerobiológico, estableciendo itinerarios saludables dentro de las ciudades con el fin de evitar las zonas de mayor riesgo potencial (Maya-Manzano et al., 2017b). También al uso de información temporal que ayuda a la prevención de síntomas y a la planificación de actividades a lo largo del año (Lo et al., 2019). De esta manera se permite comprender la distribución y concentración polínica espacio-temporal como información para intentar anticipar la prevención y el tratamiento más idóneo.

Se está produciendo un aumento de las ciudades en tamaño y población, siendo los espacios verdes cada vez más importantes para la sostenibilidad y la habitabilidad dentro de las mismas (Bush, 2020), constituyendo elementos esenciales en ciudades habitables y sostenibles (OMS, 2016b). Los espacios verdes, tanto urbanos, periurbanos y rurales (Read et al., 2014) o jardines privados fomentan estilos de vida saludables satisfaciendo necesidades humanas inmateriales como puede ser el desarrollo de sentimientos positivos y la enseñanza de valores a través de la naturaleza (Chaphekar, 2009; Chiesura, 2004). Además incluyen beneficios en la salud mental y física (OMS, 2016b), contribuyendo de manera positiva en la salud humana (Ekkel et al., 2017).

Por otra parte, los bosques urbanos y los espacios verdes en las ciudades son indispensables en la sostenibilidad urbana (Duinker et al., 2015) debido a su papel para mitigar la contaminación de partículas (Beckett et al., 1998), reduciendo las temperaturas registradas en las zonas urbanas (Maimaitiyiming et al., 2014), creando hábitat de biodiversidad (Ives et al., 2016), gestionando la calidad y cantidad de aguas pluviales (Coutts et al., 2015) y la calidad del aire (Nowak et al., 2012). Sin embargo, la calidad del aire puede disminuir como consecuencia de la liberación de granos de polen por las plantas como estrategia en su función de reproducción sexual durante el proceso de polinización (Linskens et al., 2000), produciendo episodios de emisión masiva a la atmósfera con consecuencias sobre la salud de las personas alérgicas. Por este motivo han sido identificados como uno de los principales agentes causantes de alergia polínica en los habitantes de las ciudades (Cariñanos et al., 2016). Se puede afirmar que existen un número importante de tipos polínicos que pueden provocar alergias y diversos síntomas en humanos como conjuntivitis, rinitis y asma alérgica (Pawankar, 2014). Algunos de estos son Cupressaceae, Myrtaceae (Fernández, 1992) y *Platanus* (Alcázar et al., 2011). Además, otros son recogidos en el informe Alergológica 2015 como los tipos polínicos más prevalentes en relación con las alergias en España (SEAIC 2017): Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, Amaranthaceae, *Platanus*, *Plantago*, *Parietaria* y *Artemisia*.

Además de los riesgos para la salud hay que considerar otros problemas producidos por el polen. Para la rinitis alérgica, se han realizado estudios económicos en los que se tasan los costes entre 2 y 5 billones de dólares americanos (Green et al., 2005). Entre estos costes pueden estimarse unos costes directos que pueden ser médicos (costes médicos, medicamentos, pruebas de

diagnóstico y costes de la formación de médicos) y no médicos (como el transporte). Además, se incluyen costes indirectos como la pérdida de días de trabajo y de días escolares. A esto hay que añadir otros costes denominados intangibles, que consideran la pérdida de calidad de vida, el coste social, problemas psicológicos, dolor y sufrimiento (Green et al., 2005).

En el ámbito legislativo la presente Tesis Doctoral se enmarca dentro de tres marcos normativos. El primero, haciendo referencia a las fuentes productoras de polen, las plantas, que se encuadran dentro de la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la flora y fauna silvestres (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico).

El segundo, dentro de las normativas de calidad del aire que se encuentran en vigor actualmente y que se pueden localizar en la web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. A nivel europeo está disponible:

- a) Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- b) Directiva 2015/1480/CE, de la Comisión, de 28 de agosto de 2015 por la que se modifican varios anexos de las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en los que se establecen las normas relativas a los métodos de referencia, la validación de datos y la ubicación de los puntos de muestreo para la evaluación de la calidad del aire ambiente.

En cuanto a la legislación española sobre calidad del aire actualmente en vigor viene representada por las normas:

- a) Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- b) Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

La Ley 34/2007 de calidad del aire y protección de la atmósfera establece el Sistema Español de Inventario y se desarrolla su funcionamiento en el Real Decreto 818/2018 que asigna a la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico la función de autoridad competente del Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones a la Atmósfera (SEI). Este Inventario de Emisiones a la Atmósfera está incluido en el Plan Estadístico Nacional, teniendo en cuenta las emisiones a la atmósfera, entre otros contaminantes, de partículas, entre las que encuadraríamos las partículas aerobiológicas.

El tercer marco legislativo en la que se encuadra la presente Tesis Doctoral es en el ámbito de la salud y más concretamente a nivel nacional en la Ley 33/2011, de 4 de octubre, General de Salud Pública (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico).

Sin embargo, a pesar de que la Aerobiología podría estar enmarcada en tres ámbitos legislativos distintos, a la importancia de las alergias causadas por algunos tipos polínicos y los costes económicos producidos para paliar estas alergias, aún no existe una legislación europea o nacional que regule la concentración polínica en las ciudades o haga mención al control de estas concentraciones. En este aspecto, tan solo el Segundo Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC-2) 2021-2030, siendo un instrumento de planificación básico para promover la acción coordinada frente a los efectos del cambio climático en España, hace una ligera mención como efectos indirectos del cambio climático sobre la salud humana a los aeroalérgenos, pero sin especificar el tipo.

Por lo tanto, ante este panorama legislativo, la creación de herramientas de información aerobiológica que integren la capacidad de mostrar las predicciones de las concentraciones de los tipos de polen más alergénicos como por ejemplo Poaceae (Fernández-Rodríguez et al., 2018a) u *Olea* (Fernández-Rodríguez et al., 2016a) y que establezcan relaciones entre la densidad de árboles ornamentales en las ciudades y la concentración polínica emitida por los mismos (Maya-Manzano et al., 2017c), se plantea como algo oportuno y beneficioso para una gran cantidad de individuos sensibles al polen (Šikoparija et al., 2018). Esto permitirá desarrollar ideas y tomar medidas que reduzcan la concentración de granos de polen de potencial alergénico (Maya-Manzano et al., 2017b) incluso a la hora de diseñar y realizar nuevas construcciones (Fernández-Rodríguez et al., 2018b).

El contenido polínico en el aire está condicionado por varios factores como las condiciones meteorológicas, la vegetación, la contaminación del aire (De Weger et al., 2013; Sung et al., 2017), los sustratos disponibles (Gonzalo-Garijo et al., 2006), la modificación del uso de la tierra o la introducción de especies ornamentales (Cristofori et al., 2010; Sing et al., 2017). También está condicionado por factores ambientales que permiten su formación, liberación, transporte y deposición (Maya-Manzano et al., 2017a; Tormo-Molina et al., 2013). Estas condiciones pueden variar a nivel local y regional produciendo diferencias tanto en las concentraciones polínicas como en las fechas principales de polinización dependiendo del lugar. Si son importantes las variaciones espaciales en el polen (Oteros et al., 2019a) también lo son a nivel temporal. Para ayudar a comprender la distribución y concentración en determinados lugares se realizan los llamados calendarios polínicos, representación gráfica que muestra la dinámica anual de los principales tipos de polen (Elvira-Rendueles et al., 2019). Además los calendarios son útiles porque proporcionan información tanto a los pacientes para evitar la exposición innecesaria, como a los médicos para planificar la prevención y desarrollar pruebas de diagnóstico y tratamiento, así como su optimización (Katotomichelakis et al., 2015).

Los calendarios de polen dependen de su ubicación, ya que la floración de las plantas está determinada por factores ambientales, siendo por ejemplo la latitud un indicador de la temperatura y la duración de la luz del día (Lo et al., 2019), lo que influye en la fenología de las plantas y en la concentración de polen en el aire. Por lo tanto, la geolocalización y representación de los mismos en mapas mediante gradientes regionales utilizados en Aerobiología por ejemplo para el estudio de *Olea* (Aguilera et al., 2015) y *Quercus* (Lo et al., 2019), permiten mostrar de forma rápida, fácil y visual los datos ofrecidos por los calendarios polínicos, ayudando tanto a pacientes como a personal sanitario a anticiparse a las fechas de mayor probabilidad de padecer síntomas alérgicos (Capítulo I).

La Aerobiología en los últimos años ha desarrollado importantes avances tecnológicos mediante herramientas que ayudan a proporcionar una mayor información acerca de pronósticos relacionados con el proceso de polinización, siendo ampliamente utilizado por diversos autores (Bogawski et al., 2014; Damialis et al., 2007; de Weger et al., 2014; Rojo et al., 2017; Silva-Palacios et al., 2016; Tormo-Molina et al., 2010). También se ha avanzado en el desarrollo de técnicas y herramientas que proporcionen información en tiempo real como Pollin'air (Grégori et al., 2019) o el sistema de alarma del polen de Ambrosia (Csépe et al., 2019) y en el desarrollo de modelos que pronostican las concentraciones polínicas en áreas no monitorizadas (Oteros et al., 2019a).

Se han creado también índices como IUGZA (Cariñanos et al., 2014), que proporciona información cuantitativa para estimar la alergenidad de las especies arbóreas en espacios verdes urbanos. Sin embargo, el diseño urbanístico tiene un papel importante en la circulación del aire, impidiendo la dispersión de los granos de polen si estas corrientes de aire no pueden fluir libremente, pudiendo quedar retenidas altas concentraciones polínicas en algunos lugares (Cariñanos et al., 2002), ya que los edificios de la ciudad influyen en esta dispersión (Thompson, 1993). Por este motivo es importante tener en cuenta algunas características propias de la ciudad como por ejemplo, la altura de edificios, la amplitud de sus calles y la orografía del terreno, entre otras, para elaborar mapas de riesgo aerobiológico a partir de gradientes locales que han sido utilizados para crear mapas urbanos de zonas de riesgo de contaminación ambiental (Rohde et al., 2015) (Capítulo II).

Es importante considerar el comportamiento de las plantas y sus patrones de polinización, ya que hay tipos polínicos que tienen un momento estacional específico en su polinización como ocurre con el género *Platanus* sp., caracterizado por polinizar en un corto periodo de tiempo y de manera explosiva (Alcázar et al., 2015). Sin embargo, otros tipos polínicos como Cupressaceae, familia integrada por 30 géneros y 133 especies distribuidos en todo el mundo (Schulz et al., 2005), presenta una estación polínica más prolongada, con granos de polen cuya morfología no permite

diferenciar géneros dentro de esta familia (Galán et al., 1998). Su período de polinización se extiende desde octubre hasta finales de abril y mayo (Charpin et al., 2019) o incluso junio para *Cupressocyparis leylandii* según Pecero-Casimiro et al. (2020a) (Capítulo III). Además, el tamaño y el uso que se dan no son los mismos para las especies de Cupressaceae ya que en ocasiones se usan en forma de setos tanto en parques y jardines públicos como privados (Caiiffa et al., 1993), influyendo en la variación de la producción de polen. También la cantidad de polen producida por cada ejemplar de Cupressaceae varía según la especie (Hidalgo et al., 1999), haciendo que sea muy importante tener en cuenta la producción polínica a la hora de establecer ciertos riesgos aerobiológicos dentro de las zonas urbanas (Capítulo III).

2.3. Aerobiología y Salud

La Aerobiología tiene entre sus principales aplicaciones proporcionar una información adecuada a los profesionales de la salud para la prevención de las enfermedades alérgicas provocadas por las partículas aerobiológicas (D'Amato et al., 2007).

La primera definición científica de polinosis fue realizada por el Dr Bostock (1819) en la Sociedad Médico de Londres. En 1873 fue el Dr. Blackley el primer autor que describió que la polinosis o fiebre del heno era desencadenada por la exposición ambiental a granos de polen de gramíneas. Actualmente se entiende por polinosis como la inflamación de la mucosa nasal y/o conjuntival y/o bronquial causada por alérgenos que se encuentran en los granos de polen a través de un mecanismo inmunológico IgE mediado (Valero et al., 2002).

En 1906 Von Pirquet define el término de alergenidad como un tipo especial de respuesta inmunológica o defensiva frente a sustancias que normalmente no inducen reacciones en la mayoría de las personas (Zeiss, 2011). Cuando una persona susceptible a un alérgeno interacciona con este y con los factores ambientales que se producen en ese momento se produce el efecto de alergia. Este término viene definido por la Academia Europea de Alergología e Inmunología Clínica (EAACI) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la reacción de hipersensibilidad iniciada por mecanismos inmunológicos (Johansson, 2002; 2005).

En Aerobiología tradicionalmente han sido más abundantes los estudios sobre los granos de polen aerovagantes que sobre las esporas fúngicas, aunque en la actualidad estas últimas han ido adquiriendo importancia. Esto puede deberse a que la sociedad actual está más preocupada con la calidad del aire en ambientes interiores, donde se pasa gran parte del tiempo realizando actividades domésticas o actividades laborales (Bogomolova et al., 2009). Muchos de los trabajos desarrollados en los últimos años han sido en colegios (Darus et al., 2019; Pyrri et al., 2020), hospitales (Cho et al., 2018; Tormo-Molina et al., 2012) o centros de trabajo (Ruga et al., 2019; Salo et al., 2019) relacionados principalmente con la problemática de los sistemas de ventilación (Liu, Z. et al., 2020)

y humedades de los edificios (Atosuo et al., 2020; Holme et al., 2020). Además, las esporas de los hongos son un alérgeno potencial para los individuos, ya que la exposición a esporas de hongos y fragmentos de micelios en el ambiente interior de los edificios es un factor influyente en las reacciones alérgicas y el asma (Vojtkova et al., 2020). Los alérgenos del género *Alternaria*, por ejemplo, son uno de los causantes más importantes de enfermedades alérgicas respiratorias en Europa (D'Amato et al., 1997; Maya-Manzano et al., 2016a).

Los alérgenos son proteínas o glicoproteínas capaces de inducir la producción de anticuerpos IgE específicos en individuos capaces de desarrollar enfermedades alérgicas (Anvari et al., 2019; Venter et al., 2020). Este proceso llamado sensibilización tiene lugar tras la exposición por inhalación, ingestión o inyección. A los alérgenos que llegan al cuerpo humano usando como medio de transporte el aire, y que en su mayoría entran al mismo mediante el proceso de inhalación, se les denomina aeroalérgenos. Estos, en general, son proteínas pequeñas (10-60 kDa), cuya solubilidad en medios acuosos facilita su liberación desde las partículas inhaladas al sistema respiratorio (Pomés et al., 2007).

Los estudios sobre aeroalérgenos y polinosis en España han sido realizados fundamentalmente por botánicos y médicos alergólogos, siendo por tanto en las universidades y en los hospitales públicos y privados donde se encuentran los principales investigadores en este ámbito. Los primeros están mayoritariamente integrados en la Asociación Española de Aerobiología (AEA) y los segundos en la Sociedad Española de Alergología e Inmunología Clínica (SEAIC).

El impacto negativo que tiene la presencia de granos de polen en la atmósfera sobre la salud humana es importante, ya que un elevado porcentaje de la población, sobre todo en los países desarrollados, sufre afecciones alérgicas causadas por este tipo de alérgenos. La polinosis se había asociado con manifestaciones clínicas tanto nasales como conjuntivales, pero también puede manifestarse en forma de asma dependiendo del porcentaje y de las características de cada tipo de polen. En Europa, las cifras en 2008 de prevalencia de la rinitis alérgica tenía valores medios aproximados del 25% (Bousquet et al., 2008). En un estudio llevado a cabo en 14 países de Europa en el que se analizaron varios alérgenos inhalantes se determinó que el alérgeno con mayor tasa de relevancia clínica era el de gramíneas (Burbach et al., 2009) y que la rinitis alérgica predominaba sobre otras reacciones alérgicas. En 2002 se estimaba que un 50% de los casos de polinosis eran producidos por el polen de Poaceae, un 20% por el de *Ambrosia*, un 30% por el de *Betula*, un 40% por el de *Olea* y un 60% por el de *Parietaria* (Valero et al., 2002). En España, Alergológica 2015 muestra un aumento notable en la frecuencia de rinitis alérgica en niños menores de 14 años,

aumentando el porcentaje de niños que visitan al alergólogo por esta cuestión el 46,3% del anterior estudio (Alergológica 2005) al 53,8% de este último (Alergológica 2015) (Ojeda et al., 2018).

Las afecciones alérgicas han sido descritas como la epidemia del siglo XXI, pudiendo afectar hasta un 40% de la población en países desarrollados, especialmente en edades jóvenes y con diferentes niveles de gravedad (Igea Aznar, 2006). La pérdida de biodiversidad y el cambio climático, además del estilo de vida de las personas que viven en entornos urbanos en los países ricos, parecen ser factores de riesgo para la desregulación inmune y la alteración de la tolerancia a las alergias debido a alteraciones en la composición de la microbiota intestinal y de la piel (Haahtela et al., 2013). A nivel mundial, entre el 10 y el 30% de la población está afectada por rinitis alérgica y más de 300 millones por asma (Albertine et al., 2014). En estudios llevados a cabo en Suecia indican que hubo aumentos moderados en el asma y los síntomas respiratorios en adultos comparando resultados obtenidos en 2008 y en 2016 (Borna et al., 2019). Esto puede deberse a un aumento de la concentración de partículas en el aire contribuyendo la exposición de éstas al desarrollo de asma, sensibilización alérgica y rinitis alérgica (Sompornrattanaphan et al., 2020). Con más de 150 millones de europeos afectados por una enfermedad alérgica y una previsión de aumento hasta los 250 millones en la próxima década, las alergias se han convertido en una importante enfermedad en la Unión Europea (UE). De hecho, en algunos países, más de la mitad de la población está ya sensibilizada, mientras que más del 30% sufre de al menos una condición alérgica (EAACI, 2016). En España, al igual que en el resto de la Unión Europea, las enfermedades alérgicas afectan a un 30% de la población, siendo aproximadamente la mitad de este porcentaje los que padecen alergia al polen de plantas (SEAIC, 2017). Para los pacientes alérgicos en España la manifestación más frecuente es la rinitis alérgica que afecta al 55%, además en muchos casos se asociaba a conjuntivitis (65%) y en menor medida a asma (37%), siendo el polen atmosférico el principal alérgeno encontrado (51%) (Navarro et al., 2009; Quirce, 2009).

2.3.1. Factores influyentes en la alergenidad y en el riesgo aerobiológico en ambientes urbanos

La alergenidad relacionada con los ambientes urbanos, espacios verdes y zonas urbanas ha ido creciendo en las últimas décadas en Europa debido a numerosos factores influyentes como:

- a) Un mayor uso de plantas ornamentales en parques y jardines, lugares públicos y de trabajo y casas proporcionando nuevas fuentes de aeroalérgenos (D'Amato et al., 2007).
- b) El uso masivo de especies cuyo potencial alergénico está poco documentado o es desconocido y que posteriormente pueden dar lugar a nuevas sensibilizaciones (Cariñanos et al., 2011).

c) El desuso de plantas femeninas debido a los problemas de caída de frutos y al consecuente mal olor y, por consiguiente, el uso excesivo de plantas masculinas que producen elevada concentración de polen (Ogren, 2003).

d) La elevada densidad de árboles por hectárea, aunque valores altos de densidad no motivan necesariamente un potencial alergénico alto siempre que se mantenga una adecuada riqueza específica y un bajo porcentaje de especies alergógenas (Cariñanos et al., 2016).

e) El potencial alergénico del polen emitido por las especies seleccionadas.

f) Las concentraciones de polen que pueden llegar a emitir esas plantas, el periodo de polinización de las mismas y las especificaciones de tamaño de los árboles (Maya-Manzano et al., 2017c), entre otros.

Por otro lado, a estos factores biológicos que dependen de las plantas usadas en parques y jardines tanto públicos como privados hay que sumarles otro importante número de factores que intervienen en el riesgo biológico aéreo producido por los granos de polen. Algunos de estos factores son las pendientes y características geográficas de la ciudad (Pecero-Casimiro et al., 2019), el tamaño de los edificios y la amplitud de las calles que pueden dar lugar a altas concentraciones de partículas debido a que pueden actuar de barreras y dificultar las corrientes de aire producidas entre los edificios (Thompson, 1993). Estos factores están determinados por el diseño de los elementos del entorno urbano, las características arquitectónicas de los parques (Cariñanos et al., 2014) y por el diseño de las zonas urbanas próximas a las que pueden llegar los granos de polen procedente de estos espacios verdes o de cualquier otro con ajardinamientos. Esta urbanización también afecta a los cambios de temperatura dentro de las ciudades, pudiendo afectar por tanto a la fenología de las plantas (Li et al., 2019).

Además los granos de polen no son simples portadores de alérgenos sino también de lípidos bioactivos que activan neutrófilos y eosinófilos humanos *in vitro* (Traidl-Hoffmann et al., 2002). En ambientes urbanos los altos niveles de contaminantes emitidos por los vehículos y el estilo de vida actual se correlacionan con las alergias respiratorias inducidas por el polen siendo de mayor afección en estas zonas que en zonas rurales (D'Amato et al., 2018). Esto se debe a que la contaminación del aire interactúa con los alérgenos transportados por el polen pudiendo aumentar el riesgo de sensibilización y la aparición de síntomas en los humanos (Knox et al., 1997), ya que los aeroalérgenos estimulan la sensibilización de las vías respiratorias, induciendo síntomas de asma bronquial (D'Amato et al., 2018).

Un efecto esperado del cambio climático en la salud humana es el aumento de los síntomas alérgicos y asmáticos a través de cambios en la biología del polen (Albertini et al., 2012). Estos cambios pueden ser causados por ejemplo por el ozono, que es un factor ambiental prominente

que influye en la alergenicidad del polen de abedul provocando cambios en la composición lipídica pudiendo provocar el aumento de los síntomas en pacientes alérgicos al polen (Beck et al., 2013). También el dióxido de carbono (CO₂), estimulador del crecimiento y la reproducción de plantas, influye en el aumento de síntomas alérgicos en personas debido a que niveles elevados de CO₂ pueden aumentar la cantidad de polen producido por planta (Albertine et al., 2014; Wayne et al., 2002). El polen recolectado en lugares de mayor tráfico poseen más alérgenos, por lo que estos y otros contaminantes atmosféricos podrían afectar la alergenicidad del polen y, por lo tanto, la prevalencia de alergias, como se ha visto en los casos de *Ambrosia artemisiifolia* (Ghiani et al., 2012) y *Parietaria judaica* (Urticaceae) (Fotiou et al., 2011). Estos ambientes contaminados y el cambio climático pueden tener impactos significativos en la salud humana en todo el mundo en forma de respuestas alérgicas (Albertini et al., 2012), pudiendo ser esta una de las explicaciones de que haya mayor abundancia de alergia en las zonas urbanas (Gonzalo-Garijo et al., 2006). Sin embargo, recientes estudios parecen demostrar que hay evidencias contradictorias entre quienes atribuyen una mayor alergenicidad provocada por la exposición a contaminantes (Sénéchal et al., 2015), y autores que no encuentran dicha correspondencia (Plaza et al., 2020).

El cambio climático también influyen en el riesgo por alergenicidad que representan las partículas de polen, pues el clima es un factor determinante en la concentración polínica, en la duración de la temporada de polen, la distribución de plantas y otros atributos de la planta (Beggs, 2004). Así, hay autores que afirman que la alergenicidad en el polen de árboles crecidos a mayores temperaturas es más fuerte (D'Amato et al., 2007). Además, la alergenicidad también varía según el lugar geográfico (Buters et al., 2015; Galán et al., 2013). Los cambios en el clima parecen haber alterado los patrones de distribución de granos de polen por Europa (Ziello et al., 2012), lo que podría contribuir a episodios de transporte a larga distancia de polen alérgico (Cecchi et al., 2006). Por otra parte, los cambios globales en la temperatura y la abundancia y frecuencia de precipitaciones están estrechamente relacionadas con la tendencia al alza de la concentración de polen (Kim et al., 2020), pudiendo ser explicado porque el desarrollo de gametofitos masculinos es la etapa más vulnerable al estrés térmico, con la consecuente afectación de la producción polínica (Lihani et al., 2020).

En definitiva, la dinámica atmosférica del área de estudio, la contaminación del lugar, posibles cambios a nivel global y regional del clima y los parámetros meteorológicos como temperaturas, precipitaciones y vientos (Cariñanos et al., 2014), también afectan a la concentración de partículas aerobiológicas. Conocer de manera profunda los factores que afectan al polen es esencial para predecir y comprender su dinámica (Oteros et al., 2017).

2.3.2. Granos de polen con potencial alergénico

Según Valero et al. (2002) la capacidad alergénica del polen se debe a los propios granos que se depositan en las mucosas. Los estudios realizados sugieren que las partículas de dimensiones superiores a 10 μm quedan retenidas en las vías respiratorias superiores y que en muy pocas ocasiones los granos inhalados pueden alcanzar los bronquios, aunque la penetración en estos aumenta si la respiración se realiza por la boca y más aún cuando se hace ejercicio físico. Algunos autores (Horváth et al., 2011; Hughes et al., 2020) también señalan que la ruptura de los granos de polen durante las tormentas provocaría su fragmentación en partículas de menor tamaño capaces de penetrar en las bajas vías respiratorias, así como por la capacidad de liberar alérgenos a la atmósfera. Siguiendo estas pautas se puede considerar que la aparición de asma estaría determinada en mayor medida por la cantidad de polen acumulado, es decir, durante los picos de concentración.

La existencia de plantas que florecen o polinizan en cualquier estación hace que el polen pueda ser encontrado en la atmósfera durante todo el año, provocando casos de alergia en pacientes sensibilizados. Entre la gran cantidad de plantas existentes, sólo unas pocas están involucradas en la elaboración de la mayor parte de los granos de polen alergénicos. Los tipos polínicos más alergénicos corresponden a las siguientes familias de plantas: Poaceae (gramíneas), Oleaceae (*Olea*, *Fraxinus* y *Ligustrum*), Urticaceae (*Parietaria* y *Urtica*), Compositae (*Artemisia* y *Ambrosia*), Chenopodiaceae-Amaranthaceae (*Salsola*, *Chenopodium* y *Amaranthus*), Plantaginaceae (*Plantago*), Polygonaceae (*Rumex*), Betulaceae (*Betula*, *Alnus* y *Corylus*), Platanaceae (*Platanus*), Cupressaceae (*Cryptomeria*, *Cupressus*, *Thuja*), Fagaceae (*Castanea*) y Euphorbiaceae (*Mercurialis* y *Ricinus*) (Valero et al., 2002). Además, otros autores incluyen también al polen producido por la familia Myrtaceae (Fernández, 1992).

Desde el punto de vista clínico y clasificando los tipos polínicos más importantes en tres épocas del año (finales de otoño e invierno; primavera y principios de verano; y verano y principios de otoño) se pueden encontrar durante el periodo de finales de otoño e invierno (incluyendo los meses de noviembre a marzo) los tipos polínicos de Cupressaceae (Charpin et al., 2019), Betulaceae (Mercuri et al., 2016), *Platanus* (Alcázar et al., 2011) y Urticaceae (Ariano et al., 2017; De Linares et al., 2019). Durante el periodo de primavera y principios de verano (incluye los meses de abril a julio) continúa el polen de Betulaceae (Mercuri et al., 2016), *Platanus* (Alcázar et al., 2011) y Urticaceae (Ariano et al., 2017; De Linares et al., 2019), comenzando la polinización de Poaceae (Fernández-Rodríguez et al., 2018a), Pinaceae (Fernández-Rodríguez et al., 2018b), *Olea* (Fernández-Rodríguez et al., 2016a), *Plantago* (González-Parrado et al., 2014) y *Quercus* (Maya-Manzano et al., 2016b). Por último, durante el periodo de verano y principios de otoño (incluye los

meses de agosto a octubre) estarían incluidos los tipos polínicos de *Chenopodiaceae*-*Amaranthaceae* (Rodríguez De La Cruz et al., 2012) y *Artemisia* (Giner et al., 1999).

De los tipos polínicos considerados con mayor potencial alergénico en el área mediterránea se encuentran *Olea europaea*, *Cupressus sempervirens*, *Platanus hispánica* y las gramíneas (Cariñanos et al., 2014), algunos de los cuales pertenecen a grupos de taxones que tienen una gran emisión de polen, aumentando aún más la polinosis y que se encuentran recogidos en dos grandes grupos: gimnospermas (*Pinaceae*, *Cupressaceae* y *Ginkgoaceae*) y angiospermas (refiriéndonos aquí a las especies anemófilas) (*Acer*, *Alnus glutinosa*, *Betula pendula*, *Mirtus communis*, *Morus alba*, *Populus spp.*, *Platanus*, *Phoenix* y *Poaceae*) (Givnish, 1980). Muchas de estas especies pueden tener una producción polínica por encima de los 10000 granos de polen por antera (Tormo-Molina et al., 1996).

La duración del período de polinización principal también es muy importante en cuanto al potencial de alergenicidad, ya que en el caso del período de polinización de la mayoría de las especies en los parques varía entre 1 y 6 semanas, lo que lleva a una gran carga de polen durante un período muy específico (Cariñanos et al., 2014), como podría ser el caso del tipo polínico *Platanus*. Otros tipos polínicos, sin embargo, tienen periodos de polinización muy amplios como puede ser el que pertenece a la familia *Cupressaceae*, debido principalmente a que no existen diferencias morfológicas en el grano de polen de los diferentes géneros por lo que no se puede diferenciar la contribución de cada especie ni en espacio ni tiempo (Galán et al., 1998).

En Extremadura, los principales tipos polínicos encontrados según su abundancia son: *Quercus*, *Poaceae*, *Olea*, *Cupressaceae* y *Platanus* (Pecero-Casimiro et al., 2020b) (Capítulo I). El tipo polínico *Quercus*, es el más abundante en la región extremeña debido principalmente a la gran cantidad de especímenes en la región (Maya-Manzano et al., 2016b) y las altas cantidades de polen liberado por algunos de sus taxones (Tormo-Molina et al., 1996). El género *Quercus* (**Fig. 3**) se presenta como árboles o arbustos, anemófilos (Tormo-Molina, 2014) y en el que son extraordinariamente frecuentes las hibridaciones interespecíficas, lo que hace en algunos casos muy difícil el reconocimiento taxonómico (Devesa, 1995). Este género está compuesto por unas 450 especies de las zonas templadas del Hemisferio Norte, contabilizándose en Europa unas 22 especies y en la Península Ibérica 12 (Charco et al., 2008). En Extremadura hay 9 taxones, entre ellos la encina (*Q. rotundifolia*), el alcornoque (*Q. suber*) y el melojo (*Q. pyrenaica*) (Devesa, 1995). Hojas persistentes, marcescentes o caducas. Flores unisexuales, las masculinas en amentos péndulos, perianto de 3-8 lóbulos y 6-12 estambres, las femeninas solitarias en una cúpula acrescente y con 3-6 estilos. Fruto aquenio cubierto en la base por una cúpula (bellota) (Tormo-Molina, 2014).



Figura 3. Imágenes de las hojas y frutos de *Quercus ilex* (imagen izquierda), de las hojas y flores de *Quercus suber* (imagen central) y de las hojas y frutos de *Quercus robur* (imagen derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.

El segundo tipo polínico más abundante en Extremadura es Poaceae. Este tipo polínico es producido por la familia que presta su nombre (Poaceae), presenta distribución cosmopolita y engloba entorno a más de 700 géneros que contienen alrededor de 10000 especies (Wang et al., 2013), con más de 420 de estos presentes en Europa (Galán et al., 1989), siendo los géneros más numerosos *Panicum* (400 especies), *Poa* (300 especies), *Eragrostis* (300 especies), *Stipa* (250 especies) y *Paspalum* (200 especies) (Tormo-Molina, 2014). La mayoría de sus especies son hierbas anuales o perennes aunque algunos de sus géneros engloban algunas especies con tallos endurecidos y de gran desarrollo como puede ser la caña común (*Arundo donax*) (Charco et al., 2008). Su hábito es principalmente hierbas perennes, menos comúnmente anuales y sólo rara vez más o menos leñosas. Sus hojas son dísticas o rara vez dispuestas en espiral, con una vaina abierta (rara vez cerrada) y paralelinervia, por lo general estrecha y alargada. Sus flores son individualmente pequeñas e inconspicuas, por lo común anemógamas, pero algunas veces autógamas o apomícticas o incluso entomógamas. Suelen ser hermafroditas o algunas veces unisexuales, dispuestas en espiguillas pudiendo tener desde una a muchas flores. El fruto es llamado cariopsis (Tormo-Molina, 2014). En la **Figura 4** se muestran algunas especies de esta familia.



Figura 4. Imágenes de algunas especies pertenecientes a la familia de las Poaceae. *Triticum aestivum* L. (imagen izquierda), *Panicum miliaceum* L. (imagen central) y *Saccharum officinarum* L. (imagen de la derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.

El polen de gramínea es la principal causa de polinosis en varias regiones del mundo, aunque su frecuencia puede cambiar entre zonas (Tormo-Molina et al., 2015). El polen de Poaceae es uno de las cuatro principales familias de polen alergénico (Smith et al., 2014) que inducen

rinoconjuntivitis alérgica en Europa (D'Amato et al., 2007) y uno de los tipos polínicos considerados de mayor potencial alergénico en el área mediterránea por Cariñanos et al. (2014).

En Extremadura también se puede encontrar de manera abundante el tipo polínico *Olea*, que ocupa el tercer lugar en el ranking de mayor concentración polínica de la región (Capítulo I) (Pecero-Casimiro et al., 2020b). El género *Olea* incluye aproximadamente 35 especies en todo el mundo; 98% de los olivares se concentran en el área mediterránea y el 24% están en España, principalmente presente en Andalucía (62%), Castilla-La Mancha (15%) y Extremadura (11%), siendo *Olea europaea* subsp. *europaea* var. *europaea* como el taxón más cultivado (Monroy-Colín et al., 2020). *Olea europaea* (**Fig. 5**) se distribuye por toda la zona mediterránea (España, Italia, Grecia, Turquía, Túnez, Portugal, Marruecos, etc.) principalmente en forma de cultivo, aunque también de manera silvestre (*Olea europaea* var. *sylvestris*) encontrándose en Extremadura dispersa por todo el territorio (Charco et al., 2008). Además, pueden encontrarse también cultivos de esta especie en otras zonas con climatología mediterránea, como California, Sudáfrica, Chile, Sur de Australia, etc. Es un arbusto o árbol frecuentemente por modificaciones, perennifolio. Hojas opuestas, simples, pecioladas, limbo oblongo-lanceolado o espatulado (Tormo-Molina, 2014), atenuado, coriáceo y discoloro, con envés escamoso-plateado (Devesa, 1995). Inflorescencias racemosas axilares. Flores hermafroditas, actinomorfas, tetrámeras, hipóginas. Androceo con 2 estambres, exertos. Fruto drupa, elipsoidal, con epicarpo fino y liso, mesocarpo carnoso y oleoso y endocarpo esclerificado (hueso) (Tormo-Molina, 2014).



Figura 5. Imágenes del árbol (imagen izuierda), de la flor (imagen central) y del fruto (imagen derecha) de *Olea europaea*. Fuente: Tormo-Molina 2014.

El olivo es una especie entomófila que ha ido evolucionado hasta convertirse en anemófila gracias a la producción de una gran cantidad de flores que hacen que un olivo adulto pueda producir enormes concentraciones de granos de polen (Rojo et al., 2016). Además, el polen de olivo es considerado como uno de los principales tipos de polen responsables de enfermedades alérgicas que ocurren en la región mediterránea (D'Amato et al., 2007). Es un tipo polínico de elevado potencial alergénico en el área mediterránea (Cariñanos et al., 2014) donde en algunas regiones del sur de España es el principal causante de sensibilización alérgica afectando incluso a un 40-45% de las personas (Moreno-Grau et al., 2016).

Los otros dos tipos polínicos que se encuentran en cuarto y quinto lugar en cuanto a su abundancia en Extremadura son Cupressaceae y *Platanus*. Ambos, han sido los seleccionados para proponer el índice AIROT y para desarrollar los capítulos II (*Platanus*) y III (Cupressaceae) de la Tesis, por su elevado potencial alergénico, por ser dos de los cinco tipos polínicos más abundantes de la región de Extremadura (Pecero-Casimiro et al., 2020b) (Capítulo I), por su abundancia en las zonas urbanas y también por la casuística que les diferencia, periodo y temporalidad de su polinización y en el caso de Cupressaceae, por las diferencias de producción polínica que pueden encontrarse dentro del propio tipo polínico por la influencia de las especies y sus usos (setos, arbustos o árboles). De esta manera se pone a prueba el índice usando tipos polínicos con diferentes comportamientos.

Por un lado Cupressaceae, tipo polínico perteneciente a la misma familia y que está formada por 30 géneros distribuidos por todo el mundo (Schulz et al., 2005), con un gran valor como plantas ornamentales por su frecuente uso como ornamental, en forma de setos como cortavientos y en jardines privados (Caiaffa et al., 1993), rápido crecimiento, bajas necesidades de agua y bajo coste (Charpin et al., 2019), destacando entre ellos la "tuya" (sobre todo *Thuja orientalis*) y diversos cipreses (*Cupressus sempervirens* y *C. arizonica*) (Devesa, 1995). Son árboles, raramente arbustos, monoicos o dioicos, resinosos. Hojas opuestas o verticiladas (**Fig. 6**) siendo de 2-2,5 mm *Thuja occidentalis*, de 1,2-1,5 mm *Thuja orientalis*, hojas obtusas, verde-azuladas o cenicientas *Cupressus arizonica* y hojas agudas, verde-oscuras *Cupressus sempervirens* (Devesa, 1995). Conos con escamas opuestas o verticiladas; los masculinos, con 3-7 sacos polínicos por escama; los femeninos, con escamas concrecentes, planas o peltadas y 2-24 rudimentos seminales por escama. Fructificaciones carnosas o leñosas (Castroviejo et al., 1986).



Figura 6. Hojas de *Cupressus sempervirens* (imagen izquierda) y *Platycladus orientalis* (imagen derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.

El polen de Cupressaceae es la principal causa de enfermedades respiratorias alérgicas de invierno en los países de Asia Central, América del Norte y el Mediterráneo principalmente (Charpin et al., 2019), y uno de los principales alérgenos de la región mediterránea (Hidalgo et al.,

2003). En cuanto a su polinización, varía principalmente de octubre a abril e incluso mayo (Charpin et al., 2019), lo que provoca síntomas alérgicos durante un mayor periodo, ya que el polen que va siendo liberado se suma a las concentraciones existentes en el aire (Cariñanos et al., 2014).

Sin embargo *Platanus* es el único género actualmente de la familia Platanaceae, (Weber, 2013), siendo representativo y elegido como árbol ornamental en zonas urbanas por su tolerancia a la escasez de agua y altos niveles de contaminación, rápido crecimiento y el desarrollo de una amplia sombra (Maya-Manzano et al., 2017a). El género *Platanus* son árboles caducifolios de hasta 35 metros de altura que presenta ramas abiertas formando una copa muy amplia. Sus hojas son pecioladas, 3-7 palmatífidas, con lóbulos enteros o dentados y estípulas generalmente caducas (**Fig. 7**). Presenta flores muy pequeñas con sépalos escamiformes más cortos que los pétalos que son escariosos y agudos. Sus estambres (3-8) presentan anteras alargadas, subsésiles o con filamento corto, mientras que los carpelos (3)6-9, están envueltos en la base por un penacho de pelos largos (Castroviejo et al., 1990). Tiene una amplia producción polínica y sus granos de polen provocan síntomas alérgicos respiratorios llegando a ser una de las principales causas de alergias en países del Mediterráneo como Grecia (Gioulekas et al., 2004), Italia (Bedeschi et al., 2007), Portugal (Ribeiro et al., 2014), Francia (Caillaud et al., 2015) y España (Alcázar et al., 2011; Weber, 2013). Tienen una capacidad de dispersión limitada (Bricchi et al., 2000) con patrones específicos en su polinización, ya que lo hace en un corto tiempo específico (Alcázar et al., 2015). Además, su temporalidad es bastante concreta ya que suele polinizar a partir de la segunda y tercera semana de marzo hasta finales de abril (Alcázar et al., 2011; 2015; Maya-Manzano et al., 2017b) y con una estimación de su duración de 41 días en Andalucía (Alcázar et al., 2011), alrededor de 30 en Extremadura (Maya-Manzano et al., 2017b) y 40 días en Galicia (Iglesias-Fernández et al., 2007).



Figura 7. Hojas de *Platanus hispanica* (imagen izquierda) y *Platanus orientalis* (imagen derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.

2.3.3. Herramientas de información aerobiológica

Las herramientas de información aerobiológica son elementos elaborados con el objetivo de hacer más sencilla la visualización de información sobre datos aerobiológicos, como aplicaciones

o páginas web, o la obtención de información secundaria (no obvia) y su posterior divulgación. Estos datos aerobiológicos pueden basarse en temas relacionados con microorganismos, partículas biológicas en el aire, partículas de polen y esporas, y fenología (Galán et al., 2017).

En el caso del polen y esporas de hongos los datos primarios (concentraciones) pueden ser generados siguiendo numerosas técnicas, siendo la más usada en el mundo la captura en captadores de muestreo volumétrico tipo Hirst (Buters et al., 2018a) y su posterior conteo al microscopio óptico siguiendo, por ejemplo, procedimientos de datos estandarizados según lo indicado por la Red Española de Aerobiología (REA) (Galán et al., 2007) y las recomendaciones europeas (Galán et al., 2014).

Recientemente también se están utilizando captadores automáticos de nueva generación que permiten monitorizar el polen en línea de manera automática, proporcionando datos en tiempo real (Oteros et al., 2019b), algunos con resolución horaria o incluso menor. Algunos de estos ejemplos son WIBS-4 (Oconnor et al., 2014), BAA500 (Oteros et al., 2015), KH-3000 (Kawashima et al., 2017), PA-300 (Crouzy et al., 2016) y su sucesor, Rapid E (Šaulienė et al., 2019), o Swisens-Poleno (Sauvageat et al., 2020), entre otros. Una herramienta de información basada en estos datos polínicos primarios, en este caso obtenidos mediante captadores automáticos y concretamente por el BAA500 (Bio-Aerosol-Analyzer) es el “indicador de polen” situado en Múnich y que incluye el uso de señales luminosas advirtiendo de los niveles polínicos por cada tipo de polen y la concentración de los mismos que hay en el aire en ese momento (Buters et al., 2018b). Además, también se informa a la población a través de dispositivos móviles o tabletas informáticas (Buters et al., 2018b). En este sentido, la información a través de móviles o tabletas se ha ido extendiendo cada vez más e incluso los síntomas alérgicos se pueden documentar de manera electrónica, de tal forma que los usuarios tienen información disponible sobre los diferentes tipos polínicos y sus concentraciones. Además, se pueden localizar una posible alergia al mismo, facilitando poder aprender más sobre su patrón sintomático (Matricardi et al., 2020). Para este tipo de herramientas la base de datos de partida son la concentración polínica y los tipos polínicos que producen síntomas alérgicos a cada paciente (Costa et al., 2014; Kmenta et al., 2014). Existen otras que sin dar información personalizada proporcionan datos de concentraciones polínicas como es el caso de POLLAR (Impact of air POLLution on sleep, Asthma and Rhinitis) (Bousquet et al., 2018) que informan de estas concentraciones a través de mapas isarítmicos como el Sistema de alarma de polen de *Ambrosia* (R-PAS) (Csépe et al., 2019). En la actualidad, ya existen captadores portátiles de polen como adelantaban años atrás (Berger et al., 2014), alertando de los niveles de polen donde está el usuario como es el caso del Pollensniffer, que permite recolectar polen a nivel de calle (De Weger et al., 2020).

Es importante analizar las fuentes emisoras de este tipo de partículas, así como por ejemplo conocer su ubicación, ya que algunas de las concentraciones de granos de polen registradas en las ciudades pueden explicarse por la vegetación más próxima a las mismas (Maya-Manzano et al., 2017a). También va a permitir estimar la influencia de edificios cercanos y la amplitud de las calles en las que se encuentran las fuentes en cuanto a la dispersión de los granos de polen. Además, en el caso de los árboles es importante conocer la altura y el volumen de su copa permitiendo hacer estimaciones de su potencial alergénico (Cariñanos et al., 2014).

Una de las herramientas más antiguas en las que se utilizan datos tanto de polen como de esporas de hongos son los calendarios aerobiológicos (polínicos (**Fig. 8**) y fúngicos), describiéndolos como una representación gráfica que resume la dinámica anual de los principales tipos polínicos o fúngicos de una localidad, ordenados en función del periodo de polinización o esporulación (Belmonte et al., 2002). Los primeros calendarios de distintas floraciones pudieron realizarse gracias a los estudios que en 1873 realizó Backley en la atmósfera de Manchester (Martínez-Cócerca et al., 2003). Kennedy (1953) fue otro de los primeros en crear calendarios relacionados con estas partículas utilizando para ello muestreadores de gravedad. En cuanto a los calendarios de esporas de hongos, Waldbott et al., (1941) crearon calendarios basándose en las fechas de los síntomas producidos por esporas de hongos, llamándolos “calendarios de síntomas”.

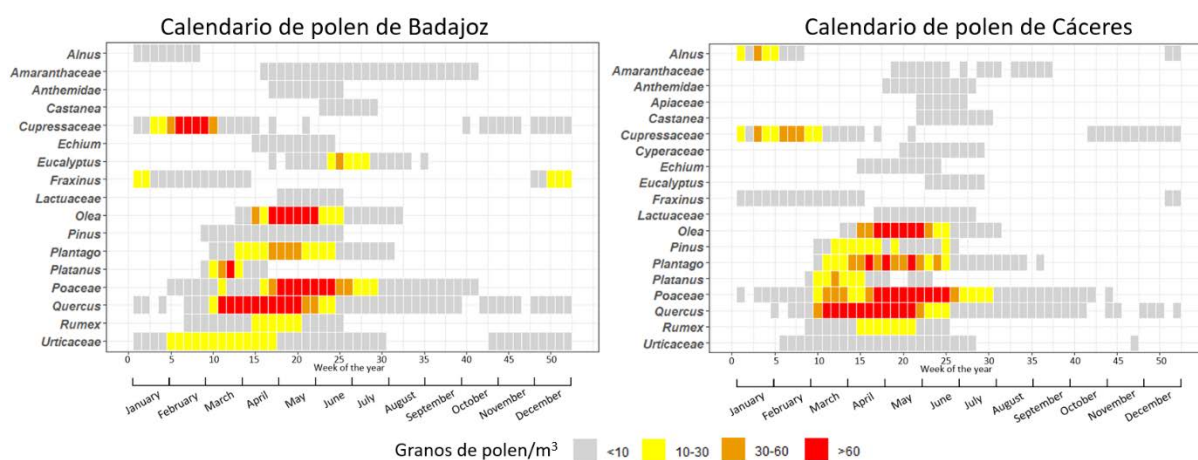


Figura 8. Calendario polínico de los principales tipos recogidos en Badajoz y Cáceres. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2020b).

Este tipo de herramientas son ampliamente utilizadas porque proporcionan información resumida a partir de datos de concentración, fácilmente interpretable y ayuda a los especialistas en alergias de este tipo a elaborar tratamientos para las personas que padecen síntomas alérgicos. Además, ayuda a estos últimos a tomar medidas durante los periodos de mayor riesgo alergénico con el fin de reducir la exposición en los días de concentraciones más elevadas.

Por otro lado, existen numerosas herramientas de información basadas en las fuentes emisoras de polen, las plantas, que utilizan la ubicación y características biológicas de las mismas

para tratar de proporcionar información que pueda ser utilizada por las personas. Este es el caso por ejemplo del índice I_{UGZA} (Urban Green Zone Allergenicity Index), que utiliza la superficie de los ejemplares, la altura, la duración de su polinización y el potencial alergénico entre otras para proporcionar el potencial de alergenicidad de una zona verde (Cariñanos et al., 2014). Existen otras como Pollin'air en la que personas voluntarias hacen el seguimiento de plantas que producen polen alergénico con el objetivo de informar a las personas que tienen alergia en tiempo real, proporcionando la ubicación exacta de estas fuentes con el objetivo de que puedan ser evitadas (Grégori et al., 2019).

También existen herramientas de información aerobiológica que tienen en cuenta tanto las fuentes como la concentración de polen en la atmósfera en forma de datos de entradas que tienen como objetivo proporcionar información. Muchos de estos trabajos persiguen incluso mostrarlo en forma de mapas proporcionando información para estudiar el impacto en la salud y las implicaciones ecológicas (Oteros et al., 2017).

En Extremadura, el grupo AeroUEX (Aerobiología en Extremadura) es el responsable de gestionar la Red Extremeña de Aerobiología, llevando varios años desarrollando e investigando sobre herramientas informativas útiles para la población y para la comunidad científica. Algunas de estas herramientas llevan tiempo funcionando como es la información de los niveles de polen mediante el envío de SMS (Diario Hoy, 2007) o a través de su página web (<http://www.aerouex.es-https://www.eweb.unex.es/eweb/botanica/polen/aerouex.htm>). La última de las herramientas incorporadas al grupo es una aplicación para smartphones (*AeroUEX app.*) que registra las concentraciones de polen (El Periódico de Extremadura, 2019), informando de la presencia de las fuentes polínicas más cercanas según la ubicación de la persona y proporcionando otras informaciones como la localización de sus estaciones y predicciones.

En su línea de investigación se busca proporcionar información que pueda ser de utilidad para personas alérgicas y profesionales de la salud. Numerosos trabajos se centran en el pronóstico de concentraciones polínicas para diversos tipos como puede ser el caso de Cupressaceae (Silva-Palacios et al., 2016), *Quercus* (Fernández-Rodríguez et al., 2016b) y Poaceae (Fernández-Rodríguez et al., 2016c), en el desarrollo de herramientas mediante el modelado de granos de polen con el objetivo de evitar puntos de aislamiento en el diseño de edificios (Fernández-Rodríguez et al., 2018b), así como la geolocalización de los árboles ornamentales, que puede ser utilizada para crear itinerarios saludables y medidas para mejorar el desarrollo urbano verde (Maya-Manzano et al., 2017b). También, en el caso de polen, sus patrones en el aire de Don Benito, Plasencia y Zafra (Maya-Manzano et al., 2016a), así como las relaciones con las coberturas del suelo (Maya-Manzano et al., 2017a).

Además, se han realizado trabajos con esporas de hongos en los que por ejemplo se ha analizado el transporte de *Alternaria* en Badajoz (Fernández-Rodríguez et al., 2015), así como la creación de un modelo predictivo para esporangios en el aire de Oomycota donde se incluyen las especies de *Phytophthora* (Maya-Manzano et al., 2015).

2.4. Aerobiología y nuevas tecnologías

La llegada de nuevas tecnologías al ámbito científico de la Aerobiología ha supuesto un cambio importante sobre todo en la divulgación científica, ya que por ejemplo las redes sociales permiten mostrar datos e información al público en general dando a elegir entre numerosos medios dependiendo de las necesidades que tenga cada persona. Además, los avances tecnológicos han permitido crear un banco de datos polínicos nacional permitiendo una coordinación mayor entre los diferentes grupos de investigación (nacional y internacional), como por ejemplo la EAN (European Aerollergen Network).

En cuanto a tecnologías y software para el desarrollo de las investigaciones en el ámbito, han sido muchas las aplicadas en los últimos años y casi todas persiguen el objetivo de mejorar la vida de las personas alérgicas gracias a la información que proporcionan. Un ejemplo de esto puede observarse en las cada vez más abundantes aplicaciones móviles (Bousquet et al., 2018; Costa et al., 2014; Csépe et al., 2019; Kmenta et al., 2014), el uso combinado de índices de vegetación en teledetección y Aerobiología como EVI (Enhanced Vegetation Index, Devadas et al., 2018) o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, (González-Naharro et al., 2019), o usando tecnología digital como BIM (Building Information Modeling) (Fernández-Rodríguez et al., 2018b) y LiDAR (Bogawski et al., 2019a; Reagan et al., 2017). Dentro de los softwares de estadística también se ha producido la creación de paquetes específicos de Aerobiología como el paquete de R “AeRobiology” (Rojo et al., 2019). Lo mismo ha ocurrido con el uso generalizado de los Sistemas de Información Geográfica (Maya-Manzano et al., 2017a; Rojo et al., 2015a).

2.4.1. LiDAR

LiDAR (acrónimo del inglés Light Detection and Ranging) es una técnica de teledetección que permite medir la distancia exacta de un objeto en la superficie de la Tierra utilizando un haz láser pulsado. El tiempo que tarda el láser en llegar al objetivo y volver es lo que marca la distancia entre los dos puntos. Esta información generada puede ser utilizada para obtener un mapa en 3D de alta resolución sobre la superficie terrestre y los objetos que se encuentran sobre la superficie de la tierra (Gamba et al., 2000). El instrumento LiDAR (**Fig. 9**) tiene tres componentes principales, escáner, láser y receptor GPS, aunque también tiene otros elementos importantes en la recolección y análisis de datos como el fotodetector y la óptica.

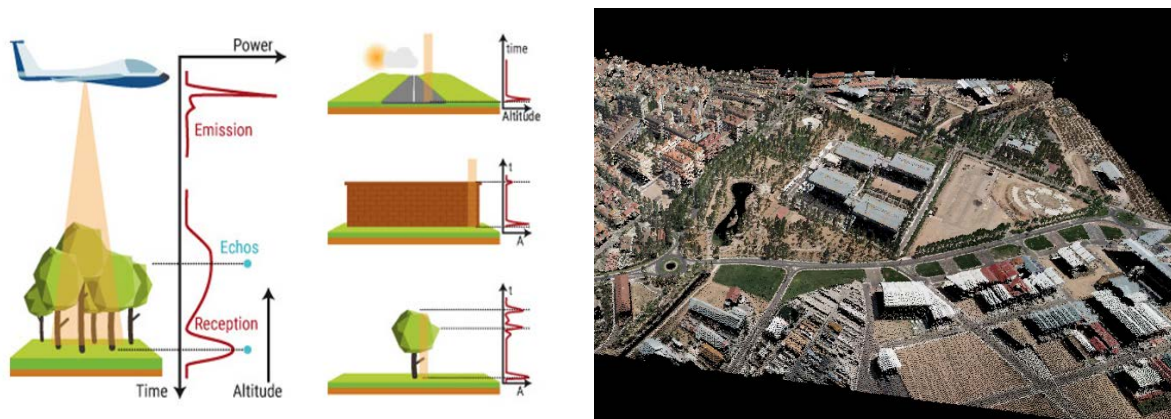


Figura 9. Esquema de funcionamiento de LiDAR (imagen izquierda) y levantamiento de la ciudad de Don Benito a partir de puntos LiDAR (Imagen derecha). Fuentes: <https://www.yellowscan-lidar.com/es/knowledge/how-lidar-works>; Pecero-Casimiro et al. (2019).

Las aplicaciones de LIDAR son numerosas y con una tendencia en aumento. Aunque su origen son los estudios de geología ya que es muy útil para conocer el terreno y sus características, en los últimos años se ha generalizado su uso a nivel de gestión forestal y agrícola ya que puede servir para medir masas forestales arbóreas, obteniendo mapas digitales de las distintas áreas de vegetación. En la agricultura de precisión, este instrumento se hace fundamental ya que aporta información georreferenciada para identificar las zonas más húmedas de la parcela, el estrés por sequía de las plantas y optimizar el uso del agua (Gautam et al., 2020), así como las zonas de deficiencias de ciertos tipos de nutrientes o minerales pudiendo identificar las distribuciones espaciales de nitrógeno y fósforo y analizar su efecto en la vegetación (Jeong et al., 2017). En cuanto a la gestión forestal, debido al uso de esta tecnología para la caracterización de bosques (Borgogno Mondino et al., 2020) se pueden hacer mapas y estudios muy detallados de los mismos, ya que teniendo en cuenta los valores de altura y la cantidad de ejemplares es posible conocer la biomasa (García et al., 2011).

Las aplicaciones atmosféricas también son muy valiosas ya que se pueden medir las densidades de los materiales que se encuentran en la atmósfera, así como monitorizar y controlar las concentraciones de aerosol inorgánico, principalmente partículas $PM_{2.5}$ a largo plazo en zonas muy contaminadas (Zhang et al., 2020). También se puede analizar el efecto de los árboles urbanos en la reducción de la temperatura creando mapas urbanos con el fin de desarrollar herramientas de simulación de diseño de espacios verdes (Barbierato et al., 2019).

En el campo de la Aerobiología, LiDAR también es utilizado para estimar el tamaño y la ubicación de las fuentes potenciales urbanas de polen, así como la detección y caracterización de este polen en la atmósfera, como el caso del abedul (Bogawski et al., 2019a; Bohlmann et al., 2019). También se ha usado para el estudio de la densidad y altura de las copas de los árboles (Kanja et

al., 2020) y para previsiones de polen de *Pinus* y *Platanus* en el aire (Sicard et al., 2018). Cada vez es más utilizada en la planificación urbana y el uso del suelo (Farzinmoghdam et al., 2019).

2.4.2. Sistemas de Información Geográficos (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de herramientas que permiten organizar, almacenar, manipular, analizar y modelizar grandes cantidades de datos geográficos. Estos datos tienen una referencia espacial, es decir, una ubicación y una información atribuida que detalla aún más sobre el elemento en cuestión y que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz. En definitiva, los SIG son herramientas que permiten analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

Los SIG son muy utilizados en el ámbito de la Botánica para mapear las zonas de la tierra que es más idónea para especies como *Persea americana* (Rahmawaty et al., 2020), para el diseño y muestreo de suelos y la práctica del manejo natural de bosques de *Pinus taiwanensis* (Liu et al., 2020) así como la evaluación de los cambios en la cobertura del suelo gracias a la construcción de un atlas de superficie (Maragno et al., 2020). También en agricultura para la mejora de cultivos y en la planificación, el diseño, la realización, el control y el análisis de ensayos de campo para generar nueva información en la toma de decisiones (Honecker et al., 2020).

En Aerobiología el uso de los SIG también ha ido aumentando con el paso de los años, probablemente influenciado por factores como la mejora de los ordenadores, el desarrollo de las nuevas tecnologías, la digitalización de datos y la comprensión de estos bioaerosoles (Maya-Manzano et al., 2017a). Además permite evaluar, planificar y diseñar parques urbanos (Pauleit et al., 2000), crear inventarios de vegetación (Skjøth et al., 2008) y analizar posibles fuentes emisoras de polen y crear mapas de fuentes de polen basados en el uso de la tierra (Oteros et al., 2017).

La información sobre la distribución de las fuentes de polen, relacionada con su presencia y abundancia en una región específica es importante, especialmente, cuando se aplican modelos de transporte atmosférico para pronosticar las concentraciones de polen (Kurganskiy et al., 2020). De esta manera pueden establecerse relaciones fuente-receptor de los tipos de polen de diferentes zonas como se hizo en Inglaterra para el aliso (*Alnus*), el abedul (*Betula*) y el roble (*Quercus*), creando mapas de fuentes que informan de la procedencia de estos tipos de polen en las zonas urbanas de Inglaterra (Skjøth et al., 2015). Además, incluir datos de polen en la producción de mapas de fuentes para el modelado de dispersión de polen y para estudios de exposición tiene una gran importancia (Kurganskiy et al., 2020), ya que permite, por ejemplo, obtener mapas fenológicos continuos que determinan el patrón de la sucesión de la floración del olivo (Rojo et al., 2015b). Además, con la geolocalización de estas fuentes pueden establecerse itinerarios saludables en las ciudades que proporcionan información sobre los lugares potenciales más dañinos a las personas alérgicas y al

personal sanitario (Maya-Manzano et al., 2017c), así como desarrollar recomendaciones para las autoridades sobre la gestión de los espacios verdes urbanos (Ćwik et al., 2018). También podría servir de información para la planificación urbana y la construcción de nuevos edificios con el fin de evitar posibles puntos de aislamiento en el diseño de envolventes de edificios (Fernández-Rodríguez et al., 2018b).

El espectro del polen y las variaciones en su composición y concentraciones está influenciado por el uso de la tierra y sus cambios (García-Mozo et al., 2016). La interpretación de los niveles de polen en el aire en las ciudades basada en la contribución de la flora y la vegetación circundantes es una herramienta útil para estimar las concentraciones de alérgenos en el aire (Rojo et al., 2015a). Además de la cobertura terrestre del área que rodea al captador, el flujo de masas de aire también influye en las concentraciones polínicas. En definitiva, la cantidad de polen en el aire es el resultado de la contribución de las áreas verdes locales y la vegetación extraurbana, además de la dirección y velocidad del viento (Ciani et al., 2020). Representar en mapas las concentraciones de polen es importante para estudiar el impacto en la salud y las implicaciones ecológicas o para fines forestales o agronómicos (Oteros et al., 2017).

2.4.3. Estadística aplicada a la Aerobiología

En Aerobiología el uso de la estadística es fundamental para conocer concentraciones, relaciones entre variables, elaboración de gráficos, etc. Además, con las nuevas tecnologías son muchas las herramientas y los softwares estadísticos utilizados para realizar numerosos estudios. A los ya conocidos SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) o MatLab, se le ha unido en los últimos años R (R Core Team 2017), que facilita el trabajo con bases de datos de gran volumen (big data).

Dentro de R recientemente se ha creado un paquete (“AeRobiology”, Rojo et al., 2019), para crear diferentes herramientas para la gestión de bases de datos de partículas en el aire, estableciendo cálculos y permitiendo la visualización de resultados. Este ha sido utilizado para calcular la abundancia relativa de los tipos polínicos de Múnich (Rojo et al., 2020), conocer las características de las temporadas de polen de *Olea* (Fernández-Rodríguez et al., 2020) y calendarios polínicos (Pecero-Casimiro et al., 2020b)(Capítulo I). En los próximos años se prevé una creciente influencia en trabajos usando el software Phyton, sobretodo como consecuencia de su mayor desarrollo en la implementación de algoritmos de machine learning para el reconocimiento automático de granos de polen (Sauvageat et al., 2020).

2.5. Hipótesis de la Tesis Doctoral

La hipótesis general de la presente Tesis Doctoral se centra en comprobar el riesgo de origen aerobiológico en el espacio (mapas a escala local y regional), así como en el tiempo (comparación de datos interanuales y calendarios polínicos). Para el desarrollo se plantea el análisis y desarrollo de herramientas de información aerobiológica basadas en fuentes ornamentales urbanas y en concentraciones de granos de polen aerovagantes. Para la realización del estudio se plantea un método científico que aborde los objetivos planteados en las metodologías desarrolladas en los Capítulos I, II y III.

3

OBJETIVOS



3. Objetivos

El objetivo general de la presente Tesis Doctoral es crear herramientas que muestren información aerobiológica polínica a escala regional mediante el desarrollo de calendarios aerobiológicos y análisis de gradientes geográficos de concentraciones polínicas (Capítulo I) y a escala local, mediante la elaboración de mapas urbanos con geolocalización de las principales fuentes de polen alergénico en el aire (Capítulos II y III). Estas herramientas tienen como destinatarios principales las personas alérgicas, el personal sanitario general y específico de alergología, y de manera general al resto de la población. El objetivo general se desglosa en una serie de objetivos específicos planteados en los diferentes capítulos de esta tesis:

3.1. Capítulo I

Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain).

1. Analizar el espectro de polen de Extremadura utilizando datos obtenidos a partir del muestreo aerobiológico.
2. Crear calendarios de polen para las cinco ciudades de la Red de Aerobiología de Extremadura (Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra).
3. Crear gradientes geográficos regionales de polen y trazar las características del periodo de polinización principal como las fechas de inicio, la fecha pico, la fecha de finalización y la duración en cada una de las ciudades, proporcionando así información geográfica importante que puede usarse como variable predictiva en el pronóstico del polen y como herramienta informativa.

3.2. Capítulo II

Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees.

1. Desarrollar un índice aerobiológico para crear mapas de riesgo para árboles ornamentales (AIROT, del inglés Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees).
2. Relacionar diferentes parámetros aerobiológicos (abundancia de fuentes de polen y grado de madurez de los ejemplares) con aspectos como las características geográficas, pendientes, altura sobre el nivel del mar y diferencias intrínsecas en las características urbanas de cada ciudad, incluida la presencia de edificios y diferencias en la planificación urbana.

3. Crear mapas de riesgo aerobiológicos de Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra para el género *Platanus* sp. utilizando Kriging y en base a datos LiDAR y el índice AIROT.
4. Desarrollar itinerarios urbanos saludables con el fin de evitar las zonas de mayor riesgo aerobiológico.

3.3. Capítulo III

Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology.

1. Poner en práctica el índice aerobiológico AIROT con especies dentro de la familia Cupressaceae considerando las diferencias existentes en el uso de cada especie (seto, arbusto o árbol).
2. Introducir un nuevo indicador (parámetro α) en el propio índice AIROT que considerará la producción de polen de cada especie y su contribución al espectro de polen en el aire.
3. Elaborar mapas de riesgo aerobiológicos de Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra para especies de la familia Cupressaceae utilizando Kriging en base a datos LiDAR y el índice AIROT en diferentes meses teniendo en cuenta la fenología de las diferentes especies.
4. Crear mapas de riesgo aerobiológicos para el turismo en los que se localizan teóricos monumentos históricos de la ciudad de Badajoz y teóricos restaurantes de la ciudad de Cáceres con el fin de informar a la población del riesgo que hay en ciertas zonas urbanas.

4

CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS GENERALES



4. Consideraciones Metodológicas Generales

4.1. Áreas de estudio

Este trabajo se ha llevado a cabo en cinco ciudades ubicadas en la región de Extremadura (**Fig. 10**): Badajoz (BA), Cáceres (CC), Don Benito (DB), Plasencia (PL) y Zafra (ZA).

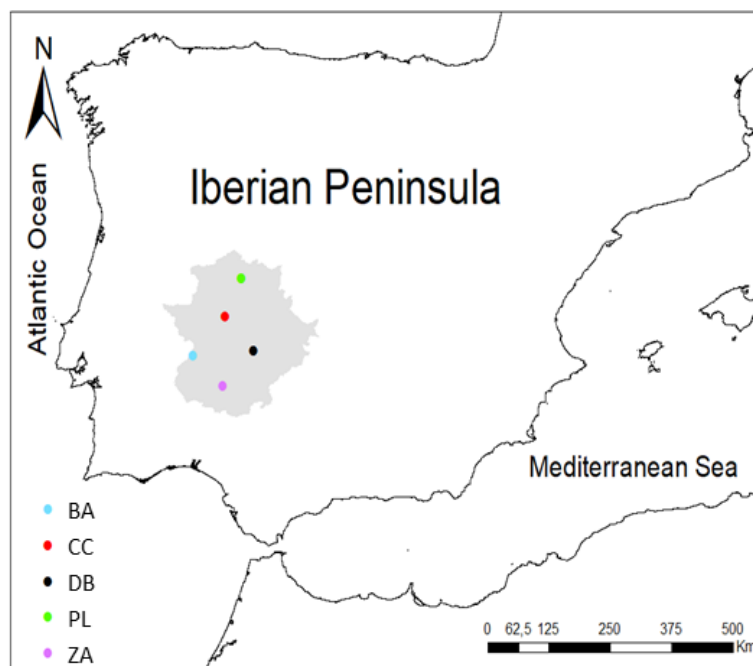


Figura 10. Mapa de Extremadura en la Península Ibérica y ubicación de las ciudades estudiadas. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2020b).

Extremadura se encuentra situada en el suroeste de España con unos 41.634 km² y con una población de 1.067.710 habitantes (INE 2019a).

La diversidad vegetal en el territorio extremeño es muy amplia, cifrándose en 2008 en alrededor de 2170 especies y subespecies (Charco et al., 2008). La flora extremeña está en su mayor parte formada por especímenes perfectamente adaptados al clima mediterráneo, aunque en el norte de Cáceres parte de su flora es predominantemente "centroeuropea". Entre los ejemplares de carácter atlántico que pueden encontrarse en las serranías más septentrionales u occidentales del territorio destacan *Drosophyllum lusitanicum*, *Ulex minor*, *Pedicularis sylvatica*, *Polygonatum odoratum*, *Streptopus amplexicaulis*, *Lilium martago*, etc. La flora regional está enriquecida con elementos alóctonos más o menos integrados en el territorio procedentes de cultivos agrícolas u ornamentales escapados y naturalizados y malas hierbas. Las plantas que se pueden encontrar en la región son fundamentalmente terrestres entre las que se cuentan algunos elementos lianoides y trepadores, algunas plantas parásitas o hemiparásitas e incluso algunas carnívoras. Se trata de una flora fundamentalmente acidófila, en consonancia con el tipo de sustrato que más predomina en el territorio, siendo las plantas basófilas bastante escasas (Devesa, 1995).

De las 4.160.200 hectáreas que posee la región extremeña aproximadamente unas 2.500.000 (el 60%) se encontraban sometidas a algún tipo de explotación agrícola o ganadera en 1995 (Devesa, 1995). Este porcentaje muestra que el número de plantas cultivadas por el sector agrícola y ganadero es muy extenso y, además, puede variar de un año a otro ya que se cambian según las demandas del mercado. Los cultivos de olivares son los cultivos de mayor extensión en Extremadura, aunque los cultivos de cereales también ocupan una importante extensión siendo estos trigo, cebada, avena, maíz y arroz (Tormo-Molina, 2000).

Estas explotaciones agrícolas y ganaderas se encuentran en ocasiones compartiendo espacio con paisajes naturales dominados por encinas (*Quercus rotundifolia*), alcornoques (*Q. suber*) y pastizales en el sur, y robles pirenaicos (*Q. pyrenaica*) y castaños (*Castanea sativa*) en el norte. A menudo, este tipo de vegetación va acompañada de matorrales como durillo (*Viburnum tinus*), jaras (*Cistus ladanifer*, *Cistus crispus*, *Cistus saalvifolius*, etc.), coscoja (*Quercus coccifera*), lentisco (*Pistacia lentiscus*), cornicabra (*Pistacia terebinthus*), madroño (*Arbutus unedo*), cantuesos (*Lavandula stoechas*), labiérnago (*Phyllirea angustifolia*), etc. Otras especies como pinos (*Pinus pinea* y *P. pinaster*), eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus*), piruétanos (*Pyrus bourgaeana*), majuelos (*Crataegus monogyna*) y quejigos (*Quercus faginea*) también son representativos. También hay superficies significativas ocupadas por *Retama sphaerocarpa* y *Cistus ladanifer* y grandes áreas utilizadas para la producción ganadera, donde se pueden encontrar plantas herbáceas como *Amaranthaceae* sp., *Echium plantagineum*, *Rumex bucephalophorus*, *Plantago lanceolata* y *Poaceae* sp. entre otras. Por otra parte, existen bosques de ribera formados por olmos (*Ulmus minor*), fresnos (*Fraxinus angustifolia*), sauces (*Salix atrocinerea*), almeces (*Celtis australis*), atarfes (*Tamarix* sp.), adelfas (*Nerium oleander*), alisos (*Alnus glutinosa*), abedules (*Betula pendula*), álamos y chopos (*Populus alba* y *P. nigra*) (Charco et al., 2008; Devesa, 1995).

En definitiva, en Extremadura hay una representación de bosques climáticos como los encinares, alcornocales, melojares y quejigares y de bosques edafoclimáticos como alisedas y fresnedas entre otros. También de matorrales de sustitución que pueden encontrarse en la etapa de recuperación o degradación (Charco et al., 2008). No obstante, los matorrales y arbustos también se encuentran presentes en la región acompañando a los árboles en los bosques pudiéndose encontrar arbustos de varias familias como por ejemplo: Cistaceae, que incluyen la jara pringosa, la jara blanca, el jaguarzo negro, jaguarzo morisco, la jara crespá, la jara macho, etc; Ericaceae, que incluyen al brezo blanco, al brezo colorado, a la quirola, la brezina y el madroño; Fabaceae, que incluyen el escobón morisco, la retama negra, el escobón blanco, el piorno, la ahulaga, la retama blanca, el tojo moruno, el tojo común, la carquesa, la retama común, la retama de olor o gayomba, la cascavieja, el codeso, etc; Lamiaceae, como el cantueso, el romero, el matagallos, la olivilla, etc;

Rosaceae, con el escaramujo, la zarzamora y el endrino; Anacardiaceae, con el lentisco o charneca, la cornicabra y el zumaque; Rhamnaceae, con el aladierno y el espino negro; Oleaceae, con el labiérnago y el jazmín silvestre, etc (Tormo-Molina, 2000).

En cuanto a la orografía, Extremadura se encuentra situada en la submeseta meridional castellana, limitada al Norte por el macizo central de la Sierra de Gredos y dividida de Este a Oeste por los Montes de Toledo, que separan las cuencas fluviales del Tajo y el Guadiana. Al Sur, Sierra Morena establece límite natural con Andalucía, mediante las sierras de Cazalla y Aracena. Las diferencias entre las cuencas del Tajo y el Guadiana se reflejan en el paisaje extremeño. La cuenca del Tajo presenta relieves accidentados donde unas sucesiones de sierras de escasa altura se encuentran separadas por cursos fluviales profundos. La cuenca del Guadiana, sin embargo, presenta mayor horizontalidad y homogeneidad topográfica (PLATERCAEX, 2006).

El clima se caracteriza por inviernos suaves (8.2 °C en enero durante el período 1981-2010) y veranos calurosos (temperaturas medias de 26.1 °C y 26.0 °C en julio y agosto durante el mismo período), siendo la temperatura media anual de 16,7 °C y con una precipitación anual de 499 mm (AEMET, 2020). El clima es mediterráneo afectado por un punto de continentalidad. Las temperaturas más altas se alcanzan en el verano, principalmente en julio y agosto, con predominancia de vientos generales del oeste (Silva-Palacios et al., 2007).

La geología y litología de Extremadura se caracteriza por la presencia de dos de las mayores zonas tectonoestratigráficas del Macizo Ibérico: la Zona Centro-Ibérica al norte y la Zona de Ossa Morena al sur. De estas dos zonas, afloran materiales terciarios y cuaternarios que forman parte de las cuencas del Guadiana y del Tajo. La Zona Centro Ibérica ocupa la parte central del Macizo Ibérico donde se encuentran los mayores afloramientos de rocas metasedimentarias, pizarras y grauvacas de Extremadura. Esta zona está enmarcada por el Precámbrico y el Cámbrico, por lo que se pueden encontrar areniscas, pizarras, conglomerados, rocas volcanosedimentarias, pizarras negras, calizas, fosfatos y sedimentos volcánicos. También materiales silicoclásticos y carbonatos, batolitos graníticos y rocas básicas. La Zona de Ossa Morena es la otra unidad tectono-estratigráfica del Macizo Ibérico en Extremadura. Está situada al sur de la Zona Centro Ibérica, y en ella se encuentran los terrenos más complejos de la región. Contiene rocas metamórficas de alto grado y rocas ígneas, aunque la mayoría son rocas calcoalcalinas intrusivas y extrusivas (SIGEO, 2010).

En cuanto a las zonas urbanas de las ciudades de Badajoz y Cáceres, predominan los edificios de mediana a elevada altura para las nuevas áreas residenciales, con amplios bulevares o avenidas y algunas grandes parques y plazas. En las zonas centro de las ciudades se encuentran calles estrechas pertenecientes a las zonas históricas. Por otra parte, Don Benito y Plasencia son ciudades más pequeñas que las anteriores con un menor número de edificios de media y elevada

altura, siendo más habitual los edificios de una o dos viviendas y donde se reduce el número de avenidas amplias. En cuanto a Zafra, la ciudad más pequeña de las cinco, no hay apenas edificios de mediana altura, siendo más habitual los edificios de dos o tres viviendas y viviendas adosadas en áreas residenciales. No hay muchas grandes avenidas, aunque sí hay dos importantes que dividen a Zafra de norte a sur y de este a oeste. No obstante el resto de calles no son muy estrechas, excluyendo las de la zona centro del conjunto histórico. Las zonas urbanas de estas ciudades también presentan un cierto desnivel que, aunque no es muy acusado en ninguna de ellas e incluso en algunas es insignificante, hay que tener en cuenta pues puede influir en la dispersión del polen desde la fuente. Las diferencias de altitud pueden inducir cambios en las series temporales fenológicas por condiciones micrometeorológicas (Scheifinger et al., 2002), aunque lo cierto es que en Extremadura no se tienen grandes diferencias de altura. Las alturas mínimas (en metros) obtenidas en las zonas urbanas de cada ciudad son: 159 en Badajoz, 335 en Cáceres, 254 en Don Benito, 328 en Plasencia y 476 en Zafra. Mientras que las alturas máximas en metros son: 225 en Badajoz, 472 en Cáceres, 294 en Don Benito, 456 en Plasencia y 541 en Zafra.

Badajoz. Capital de la provincia homónima, es el término municipal más poblado de la región de Extremadura con una población de 150.702 habitantes (INE, 2019a). El término municipal de Badajoz que se encuentra en las coordenadas 38° 53' N, 6° 48' W hace frontera por el oeste con Portugal, teniendo un área urbana de 15,4 km² y una altura sobre el nivel del mar de 184 metros. La temperatura media es de 17,1 °C con una precipitación media anual de 447 mm y un viento cuya dirección predominante es SO-NO y con una velocidad media de 18,3 km/h (AEMET, 2020).

Badajoz presenta una orografía plana y un importante patrimonio natural, en el que destacan multitud de aves y especies de plantas que tienen como hábitat el río Guadiana. En cuanto a la vegetación, alrededor de la ciudad lo que predomina son los cultivos herbáceos de regadío y secano, pastizales, frutales y encinares y alcornocales. Además, cabe destacar el amplio número de jardines y parques públicos en los que se pueden encontrar multitud de plantas ornamentales entre los que destacan los Jardines de La Galera, el Parque de Castelar, Jardines de la Trinidad, Parque de la Legión, Parque de Los Sitios de Badajoz, Parque de Rivillas y Calamón, Parque de San Fernando, Parque de La Viña, Parque de San Francisco, Parque del Guadiana, Parque de la Alcazaba y Parque Bioclimático.

Cáceres. Capital de la provincia homónima que con 96.126 habitantes (INE, 2019a) es el municipio más poblado de la provincia y el segundo de la región extremeña. Se localiza en las coordenadas 39° 48' N, 6° 20' W, con una extensión urbana de 13,6 km² y una altura sobre el nivel del mar de 459 metros. Su temperatura media es de 16,3 °C, con una precipitación media anual de

551 mm y un viento cuya dirección predominante es O-SO y con una velocidad media de 20,5 km/h (AEMET, 2020). Fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1986, ya que es uno de los conjuntos urbanos de la Edad Media y del Renacimiento más completos del mundo.

En cuanto a la orografía, Cáceres está dividida por la cordillera de Fuentes. Su entorno urbano presenta una amplia riqueza naturaleza, destacando sobretodo las aves. En cuanto a la vegetación, el uso del suelo principalmente es para cultivos como maíz, trigo, cebada y tabaco. También hay pastizales que se utiliza fundamentalmente para ganadería vacuna, ovina y porcina y un suelo de labor extensiva que corresponde a encinares, alcornocales y plantaciones de eucaliptos. Por último, una pequeña fracción del suelo se utiliza para cultivos de frutales de secano, higueras, almendros y olivares. Hay que añadir también algunas repoblaciones de eucaliptos y pinos (Tormo-Molina, 2000). En cuanto a la zona urbana, la mayor parte de la vegetación ornamental se concentran en parques y paseos entre los que destacan el Paseo de Cánovas, Parque del Príncipe, Parque El Rodeo, Paseo de Calvo Sotelo, Parque del Olivar Chico de los Frailes, Parque de Maltravieso, Parque del Cuartillo, Parque Vía de la Plata y Paseo Alto.

Don Benito. Área urbana perteneciente a la provincia de Badajoz y centro económico de la comarca de las Vegas Altas con una población de 37.151 habitantes (INE, 2019a). Su centro se encuentra situado en las coordenadas 38° 58' N, 5° 50' W y cuya extensión urbana es de 4,3 km² y a 280 metros sobre el nivel del mar. Su temperatura media es de 17,1 °C con una precipitación media anual de 460 mm y un viento cuya dirección predominante es W y con una velocidad media de 20,4 km/h (AEMET, 2020).

Su orografía está influenciada por el río Guadiana y el río Ortega, entre los que se asienta la localidad, y aunque cerca de este último hay una sierra de moderada altitud, el resto del territorio es principalmente llano. El río Ortega propicia un entorno que da lugar a los parajes naturales de Doña Blanca y la Serrezuela. La vegetación que puede encontrarse alrededor de la ciudad depende de los usos del suelo y estos principalmente están dedicados a cultivos de regadío como árboles frutales, maíz, tomate y arroz. También existen usos del suelo destinado a otros cultivos como el girasol, colza, espárragos y olivos, aunque en menor cantidad que los cultivos mencionados anteriormente. En Don Benito no hay gran cantidad de parques y jardines públicos, pero los que hay son bastante amplios en cuanto a extensión como son el Parque Municipal Tierno Galván, el Parque Municipal de las Albercas y el Parque Municipal El Palmeral. Además, muy próximos a la ciudad se pueden encontrar la Finca Municipal Doña Blanca, Embarcaderos del Guadiana y la Granja Educativa "El Mansegal", que son zonas naturales con aprovechamiento recreativo y educativo.

Plasencia. Ciudad perteneciente a la provincia de Cáceres, siendo el área urbana estudiada situada más al norte de la región de Extremadura con una población de 39.913 habitantes (INE, 2019a) y localizada en las coordenadas 43° 10' N, 2° 25' W. Tiene una extensión urbana de 4,8 km² y se encuentra situada a una cota sobre el nivel del mar de 415 metros. Su temperatura media anual es de 16,1 °C con una precipitación media anual de 694 mm y un viento cuya dirección predominante es SE y una velocidad media anual de 19,8 km/h (AEMET, 2020).

Plasencia se encuentra 83 km al norte de Cáceres y 70 km al este de la frontera con Portugal. El casco urbano está limitado por el oeste con las sierras del Gordo y Berenguer, y al este está delimitado por la sierra de Santa Bárbara por lo que es una ciudad sin muchos puntos llanos. Es bastante rica en cuanto a entornos naturales influenciado principalmente por su situación, ya que se encuentra limitada por las comarcas del Valle del Jerte, La Vera, Monfragüe, Valle del Alagón, Valle del Ambroz y Trasierra-Tierras de Granadilla, todas de gran interés natural. Los usos del suelo están influenciados principalmente por dehesas de encinas y alcornoques, por herbazales utilizados principalmente para ganadería, vegetación de ribera en la que destacan los chopos y regadíos en los que destacan pequeñas huertas familiares. Dentro de la zona urbana Plasencia posee interesantes parques y jardines entre los que destacan el Parque de la Coronación, el Parque de los Pinos, el Parque de los Caídos, el Parque de San Antón, el Parque de la Isla y el Parque del Cachón.

Zafra. Es una ciudad que pertenece a la provincia de Badajoz, siendo la ciudad de estudio situada más al sur de la región de Extremadura. Cuenta con 16.797 habitantes (INE, 2019a), estando comprendida en las coordenadas 38° 25' N, 6° 25' W a una altura de 508 metros sobre el nivel del mar y con una extensión urbana de 3,5 km². Su temperatura media anual es de 16,1 °C con una precipitación media anual de 694 mm y un viento cuya dirección predominante es SE y una velocidad media anual de 19,8 km/h (AEMET, 2020).

La orografía de Zafra es plana en cuanto a su zona urbana se refiere, aunque se encuentra próxima a la ciudad la cordillera de La Alconera, al oeste de la ciudad. No es una ciudad que destaque por sus parajes naturales, aunque cabe destacar la Sierra del Castellar situada en la cordillera mencionada anteriormente. En cuanto a los usos del suelo cercanos a la ciudad, la mayoría están dedicados a la producción ganadera y olivos, además de encinas en las zonas próximas de la cordillera de La Alconera. Dentro de la ciudad, al ser pequeña, no se encuentran un gran número de espacios verdes, aunque sí uno muy destacado y de gran extensión y diversidad de vegetación como es el Parque de La Paz, así como la vegetación que el recinto ferial alberga en su interior.

4.2. Inventario ambiental urbano

Para la creación de los mapas de riesgo aerobiológico de las ciudades a partir del índice AIROT ha sido necesario georreferenciar los ejemplares pertenecientes al género *Platanus* sp. (Capítulo II) y a las especies *Cupressus arizonica*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressocyparis leylandii* y *Platycladus orientalis* (Capítulo III) que se encuentran dentro de las zonas urbanas de las ciudades de Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra (**Tabla 1**).

El primer paso fue identificar todos los ejemplares de los taxones en estudio que se encuentran en las ciudades mencionadas anteriormente con ayuda de claves dicotómicas y con los libros “Vegetación y Flora de Extremadura” (Devesa, 1995) y “Guía botánica del campus de Badajoz de la Universidad de Extremadura” (Tormo et al., 2016). Después, los ejemplares fueron georreferenciados utilizando mapas de acceso libre como Google maps® y Google Earth Pro® versión 7.3.2.

Tabla 1. Número de ejemplares identificados y georreferenciados de los taxones utilizados para los Capítulos II y III en cada ciudad de estudio.

	Badajoz	Cáceres	Don Benito	Plasencia	Zafra
<i>Platanus</i> sp.	2686	2469	719	1749	469
<i>C. arizonica</i>	234	1770	402	309	806
<i>C. macrocarpa</i>	22	7	0	47	12
<i>C. sempervirens</i>	706	1439	288	327	340
<i>C. leylandii</i>	203	489	13	29	205
<i>P. orientalis</i>	103	225	129	20	378

Además, también se han identificado y georreferenciado otros taxones como, por ejemplo: *Acacia dealbata*, *Casuarina cunninghamiana*, *Cedrus deodara*, *Fraxinus angustifolia*, *Fraxinus ornus*, *Olea europaea*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Quercus* sp. y *Ulmus minor*.

Por otro lado, los mapas de acceso libre como Google maps® y Google Earth Pro® versión 7.3.2 también fueron utilizados para localizar los captadores volumétricos utilizadas en la captación del polen cuya geolocalización ha sido utilizada para la creación de los gradientes regionales del Capítulo I y cuyas coordenadas de localización se encuentran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Coordenadas GMS de los captadores volumétricos en las ciudades de estudio.

Badajoz	Cáceres	Don Benito	Plasencia	Zafra
38° 53' 45.42" N 6° 58' 7.535" O	39° 28' 44.51" N 6° 20' 33.467" O	38° 57' 43.38" N 5° 52' 1.307" O	40° 2' 58.488" N 6° 5' 11.652" O	38° 25' 49.69" N 6° 25' 19" O

4.3. Estudio aerobiológico

El estudio aerobiológico y la toma de muestras se ha realizado mediante el captador volumétrico de tipo Hirst (Hirst, 1952) que comprende 7 días de muestreo como máximo. Este tipo de captador volumétrico se basa en la succión de aire a partir de una bomba de vacío cuyo volumen puede ser regulado mediante el control del flujo de aire. Este aire muestreado se hace incidir sobre una superficie adhesiva, en este caso se utilizó el adhesivo Petrolatum White (número CAS 8009-03-8) para capturar granos de polen en el aire (Maya-Manzano et al., 2018; Tormo-Molina et al., 2013). Este tipo de captador es muy utilizado para el seguimiento diario y horario de las concentraciones de polen en la atmósfera.

En Extremadura los captadores se encuentran localizados; en Badajoz en el tejado del edificio Tierra de Barros de la Escuela de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Extremadura (a 6 metros de altura), en Cáceres en la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura (a 16 metros de altura), en Don Benito en el Instituto de Educación Secundaria Donoso Cortés (a 6 metros de altura), en Plasencia en el Hospital Virgen del Puerto (a 17 metros de altura) y en Zafra en el Hospital de Zafra (a 6 metros de altura). El muestreo ha sido realizado por miembros del grupo de investigación de Aerobiología en Extremadura como Inmaculada Silva Palacios, Rafael Tormo Molina, Santiago Fernández Rodríguez, José María Maya Manzano, Alejandro Monroy Colín y el autor de la presente tesis doctoral durante varios años que van de 1993 a 2019 para Badajoz (BA), de 2008 a 2019 para Cáceres (CC) y de 2011 a 2019 para Don Benito (DB), Plasencia (PL) y Zafra (ZA). Estas localidades pertenecen a la red extremeña de Aerobiología, que a su vez pertenece a la Red Española de Aerobiología (REA).

Para la preparación y montaje de las muestras se siguieron procedimientos de datos estandarizados según lo indicado por la Red Española de Aerobiología (REA) (Galán et al., 2007) con el fin de obtener los datos de polen siguiendo las recomendaciones mínimas europeas (Galán et al., 2014). El promedio diario (00.00–23.59 h) de recuentos de polen y las variaciones intradiurnas del tiempo universal coordinado (UTC) por hora se expresaron como granos de polen/m³ de aire.

4.3. Resúmenes gráficos de la metodología de los Capítulos

4.3.1. Capítulo I

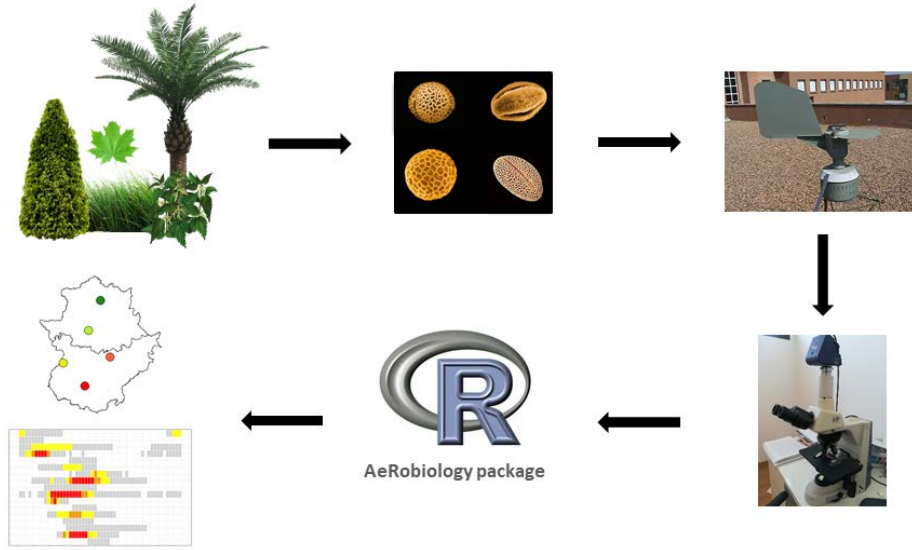


Figura 11. Resumen gráfico de la metodología del Capítulo I.

4.3.2. Capítulo II

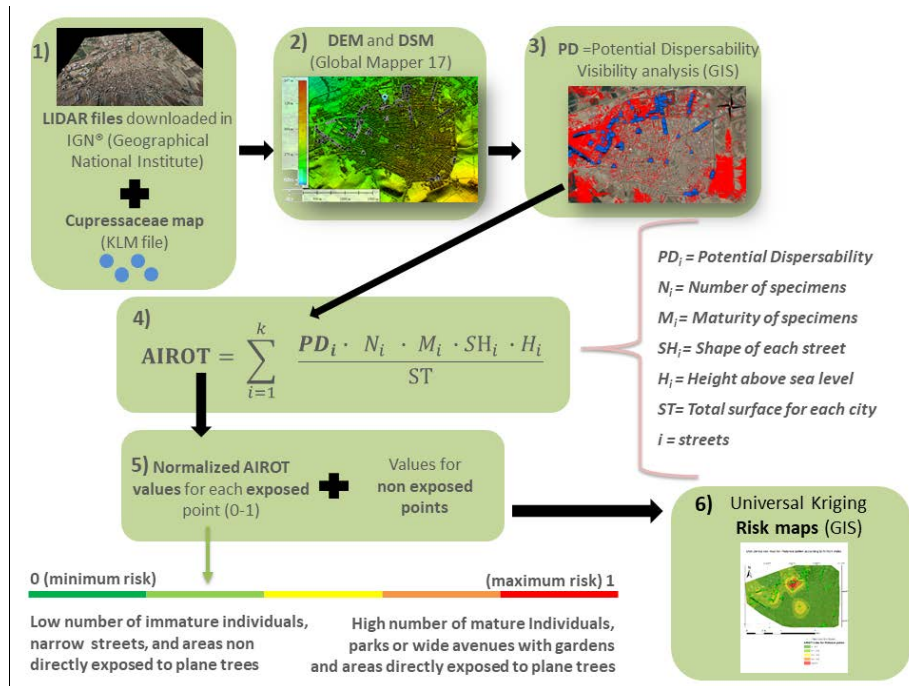


Figura 12. Resumen gráfico de la metodología del Capítulo II. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2019).

4.3.3. Capítulo III

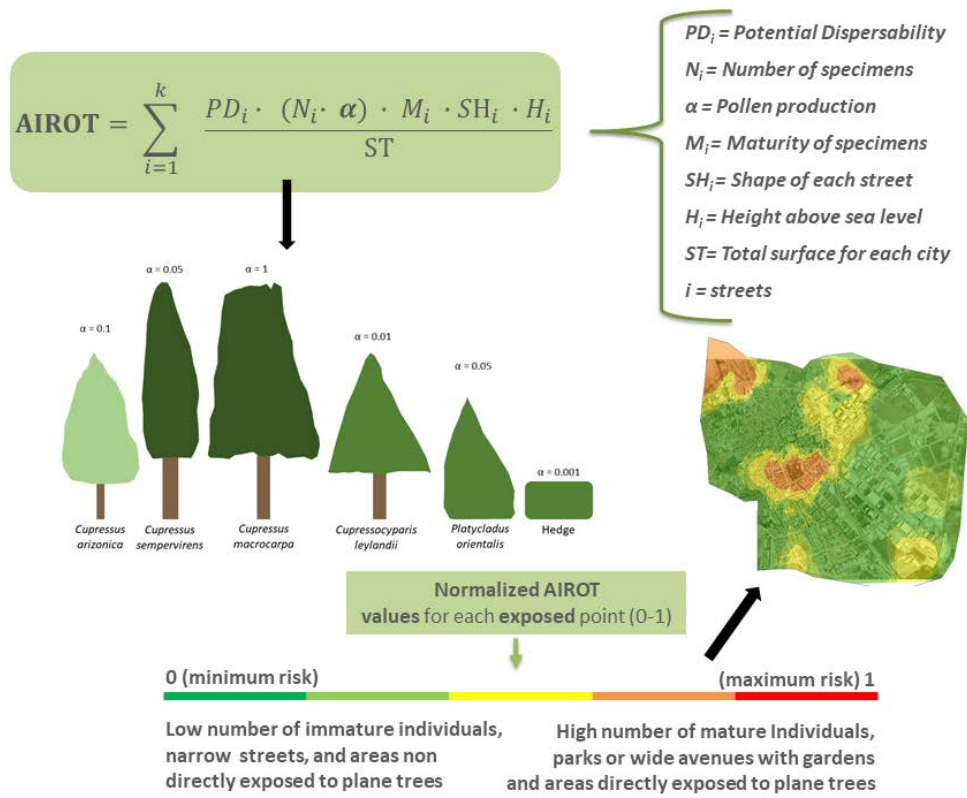


Figura 13. Resumen gráfico de la metodología del Capítulo III. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2020a).

5

RESULTADOS



5.2. Resumen

En el Capítulo I se hace un estudio aerobiológico cuyo resultado muestra que en Extremadura se identifican con frecuencia 35-40 tipos polínicos diferentes, siendo los más abundantes en orden decreciente *Quercus*, Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, *Platanus*, *Plantago* y *Pinus*. Muchos de los tipos polínicos recogidos no exceden de un API_n (Annual Pollen Integral) ≥ 100 granos de polen/m³ siendo Cáceres la ciudad de Extremadura con el mayor número de tipos polínicos (19) que exceden de este umbral, seguida de BA y DB (17), PL (15) y finalmente ZA (12). La polinización comienza antes en las ciudades del sur para la mayoría de los tipos polínicos, siendo además las ciudades del sur las que normalmente tienen una mayor duración en la temporada de polen y también las que alcanzan antes la fecha pico. Los tipos de polen con las concentraciones más altas para las 5 ciudades son *Olea*, Poaceae y *Quercus*. También excede este umbral Cupressaceae en Badajoz, Don Benito y Zafra, *Platanus* en Badajoz y Don Benito y *Plantago* en Cáceres. Las fechas en las que hay una mayor acumulación de polen en el aire son para Badajoz y Cáceres desde mediados de abril hasta finales de mayo, para Don Benito desde mediados de marzo hasta principios de junio, para Plasencia desde mediados de abril hasta principios de junio y para Zafra desde mediados de abril hasta el 10 de junio.

En el Capítulo II se calculan los valores de AIROT y se desarrollan mapas de riesgo aerobiológico en base a estos valores y a las características físicas de las propias ciudades. Los valores más elevados de AIROT se dieron en Badajoz y Cáceres, las dos ciudades en las que se encuentran el mayor número de individuos, donde generalmente estaban los ejemplares más maduros y, además donde estos se encontraban en amplias avenidas y parques. Precisamente en estos lugares es donde se recogen los lugares de mayor riesgo aerobiológico, es decir, en grandes avenidas, plazas y parques o áreas abiertas de las ciudades, donde la ausencia de obstáculos sólidos facilita la dispersión, en áreas donde hay un cierto número de individuos maduros.

En el Capítulo III se introduce el parámetro α que podría ser importante para el cálculo de AIROT en estudios en los que coincidan varias especies dentro de un mismo tipo polínico. También para estimar de manera teórica el efecto de la poda sobre la producción polínica. Además, los valores de AIROT se muestran correspondiendo con los meses en los que las especies polinizan, teniendo en cuenta su fenología. Los resultados obtenidos muestran los valores AIROT más elevados en el mes de enero en Plasencia que se debe principalmente a la elevada densidad de ejemplares y a la amplitud de las avenidas y calles en la que se encuentran los ejemplares. En febrero Don Benito tuvo el valor más alto de AIROT debido principalmente a la amplitud de las calles donde se encontraban los ejemplares de Cupressaceae, la densidad de los árboles y la madurez de los especímenes. Para marzo, también fue Don Benito el que obtuvo mayor AIROT influenciado

en esta ocasión por los parámetros que tienen en cuenta la amplitud de las áreas donde se encontraban estos especímenes y la madurez. Para los meses de mayo a junio, Don Benito nuevamente tuvo el promedio más alto junto con Badajoz, que era prácticamente el mismo. En este caso Don Benito no tenía parámetros que fueran más elevados que los observados en las demás ciudades, pero casi todos los valores de los parámetros estaban cerca de los valores máximos de las otras ciudades. Por zonas, los valores más elevados del índice se ubicaron en lugares donde se encontraron las especies con mayor producción de polen (α). También hubo valores altos en lugares donde, además de un α alto, se encontraron una gran cantidad de especímenes agrupados principalmente de *C. arizonica* y *C. sempervirens*.

Capítulo I

Pollen calendars and regional gradients as information
tools in the Extremadura pollen monitoring network
(SW Spain)

5.3. Capítulo I: Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain).

Aerobiologia
https://doi.org/10.1007/s10453-020-09667-3



ORIGINAL PAPER

Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain)

Raúl Pecero-Casimiro · José María Maya-Manzano · Santiago Fernández-Rodríguez · Rafael Tormo-Molina · Inmaculada Silva-Palacios · Alejandro Monroy-Colín · Ángela Gonzalo-Garijo

Received: 7 April 2020 / Accepted: 8 October 2020
© Springer Nature B.V. 2020

Abstract Pollen allergies are one of the most important problems among respiratory diseases in today's society. The creation and development of aerobiological information tools are useful to provide information to patients and doctors. In this work, we analysed the pollen spectrum of Extremadura to generate pollen calendars for Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra. Additionally, we analysed regional pollen gradients and plotted the main pollen season (MPS) characteristics (start date, peak date, end date and duration) in each city. In Extremadura, 35–40 different types of pollen are frequently identified, the most abundant of which (in decreasing order) belong to *Quercus*, Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, *Platanus*, *Plantago* and *Pinus*. The

dates when the highest accumulation of pollen occurs in the air are from mid-April to the end of May in Badajoz and Cáceres; from mid-March to early June for Don Benito; from mid-April to early June for Plasencia; and from mid-April to 10 June for Zafra. Moreover, it could be confirmed that in the Extremadura region, the start date and the peak date occur earlier in the cities in the south of the region and that the duration of the pollen season is longer in these cities. The differences observed among cities may be due to the varieties of urban species and their management (pruning and irrigation), the influence of peri-urban landscapes, medium- and long-distance pollen transport and climate. The representation and geolocation of pollen calendars obtained using

R. Pecero-Casimiro (✉) · R. Tormo-Molina · A. Monroy-Colín
Department of Plant Biology, Ecology and Earth Sciences, Faculty of Science, University of Extremadura, Avda. Elvas s/n, Badajoz, Spain
e-mail: raulpc@unex.es

J. M. Maya-Manzano
Center of Allergy and Environment (ZAUM), Member of the German Center for Lung Research (DZL), Technical University and Helmholtz Center Munich, Biedersteiner St., 80802 Munich, Germany

S. Fernández-Rodríguez
Department of Construction, School of Technology, University of Extremadura, Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, Spain

I. Silva-Palacios
Department of Applied Physics, Engineering Agricultural School, University of Extremadura, Avda. Adolfo Suárez s/n, Badajoz, Spain

Á. Gonzalo-Garijo
Department of Allergology, University Hospital of Badajoz, Avda. Elvas s/n, Badajoz, Spain

Published online: 19 October 2020

Springer

geographic gradients provide information in a simple, fast and visual way and can be of great interest to allergic patients and health professionals.

Keywords Pollen calendar · Aerobiological tools · Allergy · Botany · Ecology · Regional gradients · SW Spain

1 Introduction

Pollen belonging to some plants, such as Cupressaceae, Myrtaceae and *Platanus*, is related to allergies in humans provoking conjunctivitis, rhinitis and asthma (Alcázar et al. 2011; Fernández 1992; Pawankar 2014). In addition, according to the Alergológica 2015 report, the most prevalent pollen types related to rhinoconjunctivitis and allergic asthma in Spain belong to Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, Amaranthaceae, *Platanus*, *Plantago*, *Parietaria* and *Artemisia* (SEAIC 2017). Pollen allergies are caused by pollen allergens, and their airborne content is influenced by factors such as meteorological conditions, vegetation and air pollution, which differ at the regional level (De Weger et al. 2013; Sung et al. 2017). Therefore, the prediction of the daily concentrations of the most important allergenic pollens would be beneficial to a large number of individuals sensitized to pollen (Šikoparija et al. 2018). Moreover, this information about pollen concentrations and the places where they occur could be used to develop measures for reducing exposure to pollen (Maya-Manzano et al. 2017a). Aerobiological information tools such as the I_{UZGA} and AIROT indexes, real-time notification systems such as Pollin'air and the Ambrosia Pollen Alarm System (R-PAS) or aerobiological and risk maps are necessary for people with allergies and for healthcare staff (Cariñanos et al. 2014; Csépe et al. 2019; Grégori et al. 2019; Oteros et al. 2019; Pecero-Casimiro et al. 2019). These tools are also important for urban planning as prevention tools since knowledge about airborne particles can be considered in the construction of buildings to prevent pollen grains from being trapped (Fernández-Rodríguez et al. 2018a; Maya-Manzano et al. 2017b).

A pollen calendar is a graphic representation that shows the annual dynamics of the main pollen types averaged from several years of data, with a minimum

of 5 years generally being recommended, and is helpful for understanding the distribution and concentration in certain places (Elvira-Rendueles et al. 2019; Galán et al. 2017). Moreover, it is useful to provide information related to allergies to patients, to avoid unnecessary exposure and to medical doctors, for the development of diagnostic tests (Katotomichelakis et al. 2015). Many authors have proposed different methods and tools for the study of pollen concentrations and the creation of pollen calendars (D'amato and Spieksma 1992; O'Rourke 1990; Rojo et al. 2019; Werchan et al. 2018).

The presence of pollen grains in the air is related to the vegetation and substrates available, land use changes and the introduction of ornamental species into green spaces, which are environmental factors that allow the formation, release, transport and deposition of pollen (Cristofori et al. 2010; Gonzalo-Garijo et al. 2006; Maya-Manzano et al. 2017c; Singh et al. 2017; Tormo-Molina et al. 2015).

Meteorological conditions are important for the production, release and dispersal of pollen from its source (Tormo et al. 2013; Zewdie et al. 2019). Rainfall in winter probably leads to the late appearance of pollen as well as increases in pollen concentrations (Fernández-Rodríguez et al. 2014a, b). Latitude also influences the phenology of plants, and the concentration of pollen in the air because latitude is a proxy for temperature and the duration of daylight (Lo et al. 2019). For this reason, the mapping of aerobiological sources is an interesting topic due to the importance of surrounding vegetation (Rojo et al. 2015; Smith et al. 2008). This indicates that pollen calendars also depend on location due to the regional nature of plant ecology and climate, so the geolocations of these calendars allow us to identify how latitude affects pollen concentrations, according to which it is possible to generate regional gradient maps (Lo et al. 2019).

The use of geographical gradients as explanatory and informative tools is useful in other disciplines to explain the distribution of haemosporidian parasites and to evaluate the factors that drive coastal alluvial activity and its effects (Cuevas et al. 2020; Walk et al. 2020). Aerobiology has been used to represent the start date and duration of the main pollen season (MPS) in different cities of North America and for the production of airborne pollen maps for olive within the

Mediterranean region (Aguilera et al. 2015; Lo et al. 2019).

This work aims to analyse the pollen spectrum of Extremadura, taking into account the most abundant pollen types, using data obtained during several years of sampling to accomplish the following primary goals.

1. Generate pollen calendars for the five cities of the Extremadura Aerobiology Network: Badajoz (BA), Cáceres (CC), Don Benito (DB), Plasencia (PL) and Zafra (ZA).
2. Analyse the regional pollen gradients for those pollen types considered to be the most important, considering both abundance and allergenicity, and plot MPS characteristics such as the start date, peak date, end date and duration in each city, thus providing important geographic information that can be used as an input in future pollen forecasting.

2 Materials and methods

2.1 Study area

The study was conducted in five cities located in Extremadura, in the southwest of the Iberian Peninsula: BA, DB and ZA in the southern Province and CC and PL in the northern Province, which are located in different environments (Fig. 1). The respective coordinates and heights above sea level appear in Table 1. The general vegetation around the cities consisted of holm oak and cork oak trees, extensive grazing land and some forest and timber plantations of pines (PL); irrigated crops such as fruit trees, corn, tomato and rice (DB); livestock production areas, olive trees and holm-oak trees (ZA); irrigated crops (cornfields, fruit tree crops, rice crops and other horticultural cultivation), rainfed crops and pastures (BA); and cereals, livestock crops and some holm oak (CC) (Fernández-Rodríguez et al. 2018b; Maya-Manzano et al. 2017a).

The study sites in urban areas and the corresponding human populations appear in Table 1 (NSI 2019). The study area has a Mediterranean climate affected by continental conditions, with the highest temperatures in the summer, and the prevailing winds generally blow from the west (Silva et al. 2007). The

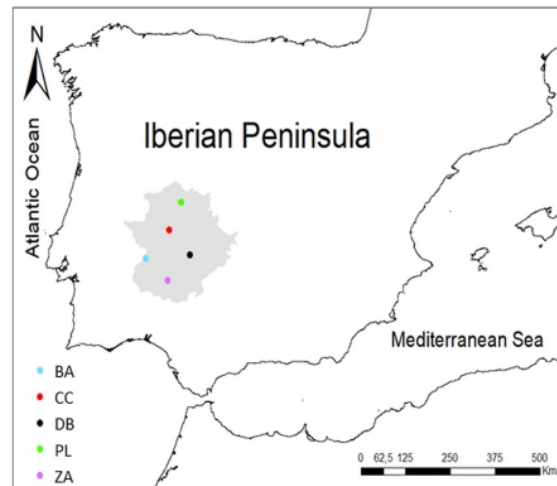


Fig. 1 Map of Extremadura in the Iberian Peninsula and the location of the studied cities: BA, CC, DB, PL and ZA

meteorological data for DB, PL, ZA, BA and CC are provided in Table 1 (AEMET 2020).

2.2 Pollen sampling

Hirst traps (Hirst 1952), for which the start of sampling is the height above ground level, are indicated in Table 1, were placed on the roofs of two local hospitals (PL and ZA), in a secondary school (DB) and in two buildings of the University of Extremadura (in the School of Agricultural Engineering in BA and in the Polytechnic School in CC). Sampling was carried out for several years in the selected cities, from 1993 to 2019 in Badajoz (BA), from 2008 to 2019 in Cáceres (CC) and from 2011 to 2019 in Don Benito (DB), Plasencia (PL) and Zafra (ZA).

According to previously published works from the same study area, the adhesive Petrolatum White (CAS number 8009-03-8) was used to capture pollen grains in the air (Maya-Manzano et al. 2018; Tormo et al. 2013). Standardized data procedures indicated by the Spanish Aerobiology Network (REA) were performed to obtain pollen data by following European minimum recommendations (Galán et al. 2007; 2014). The daily average (00.00–24.00 h) and intradiurnal variations in hourly pollen concentrations according to Coordinated Universal Time (UTC) were expressed as pollen grains/m³ of air.

Table 1 Significant data of the studied cities where are shown: coordinates, height above sea level, urban area, population, main vegetation, distance from meteorological station, mean

temperature, annual rain, average wind speed, average wind direction, average pollen concentration, pollen sampler height over ground and sampling start

	Badajoz	Cáceres	Don Benito	Plasencia	Zafra
Coordinates	38° 53' N, 6° 48' W	39° 48' N, 6° 20' W	38° 58' N, 5° 50' W	43° 10' N, 2° 25' W	38° 25' N, 6° 25' W
Height above sea level (m)	184	459	280	415	508
Urban area (Km ²)	15.4	13.6	4.3	4.8	3.5
Population (inhabitants) (NSI 2019)	150,702	96,126	37,151	39,913	16,797
Main vegetation	Irrigated/rainfed crops	Livestock crops	Irrigated crops	Holm/cork oak	Holm oak, olive groves
Distance from meteorological station (km)	12.95	2.66	0.95	2.24	0.53
Mean temperature (°C)	17.1	16.3	17.1	16.1	15.8
Annual rain (mm)	447	551	460	694	619
Average wind speed (km/h)	18.3	20.5	20.4	19.8	21.2
Predominant wind direction	SW-NW	O-SO	W	SE	N-SW
Average pollen concentration (pollen grains/m ³)	147	92	137	98	119
Pollen sampler above ground level (m)	6	16	6	17	6
Sampling start (year)	1993	2008	2011	2011	2011

2.3 Pollen analysis

The major pollen types (MPTs) were identified, defined as those whose annual pollen integral (API_n) was equal to or greater than 100 pollen * day/m³, and their concentrations were calculated and analysed according to a previous report (Galán et al. 2017). In addition, those that appeared in at least 3 out of the 5 studied cities and were considered to be most important were chosen to study their MPS characteristics, including the start date, end date, peak date, SPI_n (seasonal pollen integral) and duration. The calculation of pollen season features was performed for pollen types showing an API_n ≥ 100 pollen * day/m³ (Table 2).

2.3.1 Seasonal pollen integral (SPI_n)

SPI_n is the integral sum of the daily pollen concentrations during the MPS for a specific taxon (Galán et al. 2017). In most taxa, pollination starts after 1 January, and this day was therefore taken as the start of the pollen season. However, in Extremadura, some taxa, such as *Alnus*, Cupressaceae and *Fraxinus*, show

the initiation of pollination before 1 January in certain years and cities. In previous works, these special characteristics have been taken into account, and other interannual dates have been selected to indicate the beginning of the pollen season (Lo et al. 2019). For our study, we used the `calculate_ps` function of the AeRobiology R package to calculate the main characteristics of the pollen season (Rojo et al. 2019). For *Alnus*, Cupressaceae and *Fraxinus* pollen types, 1 October was used as the reference for the beginning of the Julian year. For the rest of the pollen types, the SPI_n was calculated as of 1 January.

2.3.2 Main pollen season

The 90% methodology was followed (Nilsson and Persson 1981), considering the MPS to begin on the date when the summed pollen grain concentration from the beginning of the year reached or exceeded 5% of the total annual pollen concentration and to end on the date when 95% of the total annual pollen accumulation had been reached or exceeded. Some types of pollen in certain years were emitted before the end of the natural year. This scenario is described in

Table 2 Data of the cities of study for the main pollen types

		<i>Alnus</i>	<i>Amaranthaceae</i>	<i>Castanea</i>	<i>Cupressaceae</i>	<i>Echium</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Fraxinus</i>	<i>Lactuceae</i>
Start date (Julian days)	BA	102	121	159	79	104	133	78	114
	CC	96	127	161	61	110	128	81	110
	DB	108	124	163	99	110	123	66	122
	PL	103	151	157	81	121	144	82	118
	ZA	105	127	166	104	106	127	78	121
End date (Julian days)	BA	144	271	215	168	167	233	175	216
	CC	141	276	216	176	195	223	177	211
	DB	145	277	212	166	168	212	152	197
	PL	144	292	217	177	179	241	150	214
	ZA	159	277	207	172	162	208	161	194
Length of the season (Julian days)	BA	43	151	56	91	64	101	97	103
	CC	45	150	56	115	86	95	96	102
	DB	38	154	50	68	59	89	86	77
	PL	42	142	61	97	59	109	69	98
	ZA	54	151	47	68	57	78	83	73
SPIn (pollen * day/m ³)	BA	171	663	125	2979	290	995	896	164
	CC	730	233	253	2198	268	188	434	311
	DB	165	286	120	4723	238	174	323	118
	PL	623	121	347	1336	170	22	714	130
	ZA	94	211	97	3004	205	57	243	95
Peak date (Julian days)	BA	114	146	180	145	126	184	104	154
	CC	113	201	178	127	131	180	146	159
	DB	119	195	183	124	144	154	102	148
	PL	122	249	188	117	145	173	118	157
	ZA	26	204	179	145	131	181	100	140
		<i>Olea</i>	<i>Pinus</i>	<i>Plantago</i>	<i>Platanus</i>	<i>Poaceae</i>	<i>Quercus</i>	<i>Rumex</i>	<i>Urticaceae</i>
Start date (Julian days)	BA	126	76	94	75	107	88	69	26
	CC	130	81	94	78	100	88	85	49
	DB	124	72	97	80	89	82	72	26
	PL	133	89	100	81	110	96	88	60
	ZA	126	82	99	80	115	95	77	46
End date (Julian days)	BA	161	166	179	100	192	155	160	301
	CC	163	173	175	118	184	151	168	261
	DB	167	223	172	105	207	162	189	231
	PL	163	173	179	108	187	152	164	237
	ZA	158	184	167	110	177	155	159	259
Length of the season (Julian days)	BA	36	92	86	26	86	68	92	276
	CC	34	93	83	41	85	63	84	213
	DB	45	144	76	25	118	81	113	206
	PL	30	85	80	29	78	58	77	178
	ZA	35	103	69	30	63	60	82	214

Table 2 continued

		<i>Olea</i>	<i>Pinus</i>	<i>Plantago</i>	<i>Platanus</i>	Poaceae	<i>Quercus</i>	<i>Rumex</i>	Urticaceae
SPIn (pollen * day/m ³)	BA	5744	540	2032	989	8699	14,014	877	1779
	CC	5166	1017	4707	968	15,234	18,531	1212	523
	DB	6673	952	1252	7221	5356	8951	494	541
	PL	3405	1155	1350	565	6654	15,838	857	265
	ZA	8414	385	1087	640	4830	11,810	433	464
Peak date (Julian days)	BA	134	93	120	81	138	100	120	110
	CC	134	122	129	86	140	100	127	88
	DB	141	161	124	83	122	103	114	102
	PL	141	131	134	95	143	108	131	121
	ZA	139	116	132	91	139	107	111	109

The table shows the start date, end date, duration of the season, SPIn and peak date. For *Alnus*, Cupressaceae and *Fraxinus*, the Julian year begins on 1 October, the rest on 1 January

Sect. 2.3.1. The duration of the MPS for each pollen type and city was the number of days between the start date and the end date and was calculated by establishing an average for all sampling years. The peak date was the day with the highest concentration of a pollen type within its MPS.

2.4 Pollen calendars

For the calculation and representation of the pollen calendars of the five studied cities, the AeRobiology computational tool created for the study of the abundance and dynamics of bioaerosols in the air under the pollen_calendar function was used (Rojo et al. 2019). Among all available methods for generating calendars, the authors decided to follow the weekly heatmap method. This calendar was based on the principles defined by Spieksma (1991), considering the weekly average pollen concentrations, which has been used by other authors (Rojo et al. 2016).

For the representation of the pollen calendars, 4 different concentration ranges were established to provide adequate orientation regarding the amount of pollen in the air. The different ranges represented by different colours were as follows: light grey (1–10 pollen grains/m³), yellow (10–30 pollen grains/m³), orange (30–60 pollen grains/m³) and red (> 60 pollen grains/m³). These colours represent different ranges of the mean pollen concentrations accumulated per week that occurred throughout the

years of sampling on each date and for each pollen type and were used to predict the peaks.

2.5 Regional gradients

The main features of the main pollen season (start date, peak date, end date and duration) and the SPIn in the five cities (BA, CC, DB, PL and ZA) were displayed in maps by using R (R Core Team 2017). However, only the five most important pollen types in terms of concentration were represented by gradients. These pollen types belonged to *Olea*, (Fig. 3), Cupressaceae (Fig. 4), *Platanus* (Fig. 5), *Quercus* (Fig. 6) and Poaceae (Fig. 7). For the considered dates (start date, peak date and end date), a blue gradient was chosen, where light blue represented the earliest cities, and dark blue represented the latest cities. For the SPIn, a gradient ranging from dark green (lowest SPIn value among the 5 cities) to darker red (highest SPIn value among the five cities) was used. Intermediate SPIn values were represented by light green, yellow and light red. Finally, for the duration of the pollen season, a gradient ranging from light red (cities with a shorter duration in terms of days of the pollen season) to darker red (cities with longer duration in terms of days of the pollen season) was used. This type of tool can be very useful for complementing the data provided by pollen calendars quickly, easily and visually.

3 Results

3.1 Pollen spectrum

In the Extremadura region, 35–40 different pollen types were frequently identified, among which the most abundant (in decreasing order) belonged to *Quercus*, Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, *Platanus*, *Plantago* and *Pinus*. However, many of the identified pollen types appeared at lower concentrations (\leq APIn 100 pollen * day/m³). The city in Extremadura with the greatest number of pollen types that exceeded this threshold (APIn \geq 100 pollen * day/m³) was CC (19), followed by BA and DB (17), PL (15) and, finally, ZA (12). Table 2 shows that the pollen types that exceeded this threshold were present at least in 3 out of the 5 studied cities. This table shows the start date, peak date, end date and duration of the pollen season and SPIn for the 16 most abundant pollen types in the study cities.

According to the results obtained, the earliest start date could be considered to occur in the southern cities (BA, DB and ZA), where 11 out of 16 pollen types first appeared earlier than in the northern cities (CC and PL), where 5 of the 16 pollen types occurred earlier. The duration of the pollen season was longer in the South than in the North for 11 of the 16 pollen types, and the peak date occurred earlier in the South for 10 of the 16 pollen types. The end of the pollen season occurred earlier in the South for 8 pollen types and in the North for the other 8 pollen types. For SPIn (pollen * day/m³), the highest values were obtained in BA for *Quercus* (14,014), Poaceae (8699) and *Olea* (5744); in CC for *Quercus* (18,531), Poaceae (15,234) and *Olea* (5166); in DB for *Quercus* (8951), *Platanus* (7221) and *Olea* (6673); in PL for *Quercus* (15,838), Poaceae (6654) and *Olea* (3405); and ZA for *Quercus* (11,810), *Olea* (8414) and Poaceae (4830).

3.2 Pollen calendars

The concentrations of each pollen type by colour and week are shown in the pollen calendars provided in Fig. 2 for the cities of BA (Fig. 2a), CC (Fig. 2b), DB (Fig. 2c), PL (Fig. 2d) and ZA (Fig. 2e). The colour scheme also indicates in which weeks the highest concentrations of pollen (red) occur in the air and the dates on which pollen grains first and last appear in the records (light grey). It also shows intermediate

concentrations (yellow and orange). The pollen types with the highest concentrations exceeding the red threshold (> 60 pollen grains/m³) for the 5 cities belonged to *Olea*, Poaceae and *Quercus*. Additional groups exceeding this threshold were Cupressaceae in BA, DB and ZA; *Platanus* in BA and DB; and *Plantago* in CC. Other important types falling within the orange range (30–60 pollen grains/m³) were *Eucalyptus* in BA; *Plantago* in BA; *Alnus* in CC; Cupressaceae in CC and PL; and *Platanus* in CC and PL. The weeks when several pollen types fell within the above orange and red ranges and greater accumulation of pollen therefore occurred in the air were weeks 16 (BA) or 17 (CC) to 22 (mid-April to late May); the weeks 12–23 (mid-March to early June) for DB; the weeks 18–23 (mid-April to early June) for PL; and the weeks 16–24 (mid-April–10th June) for ZA.

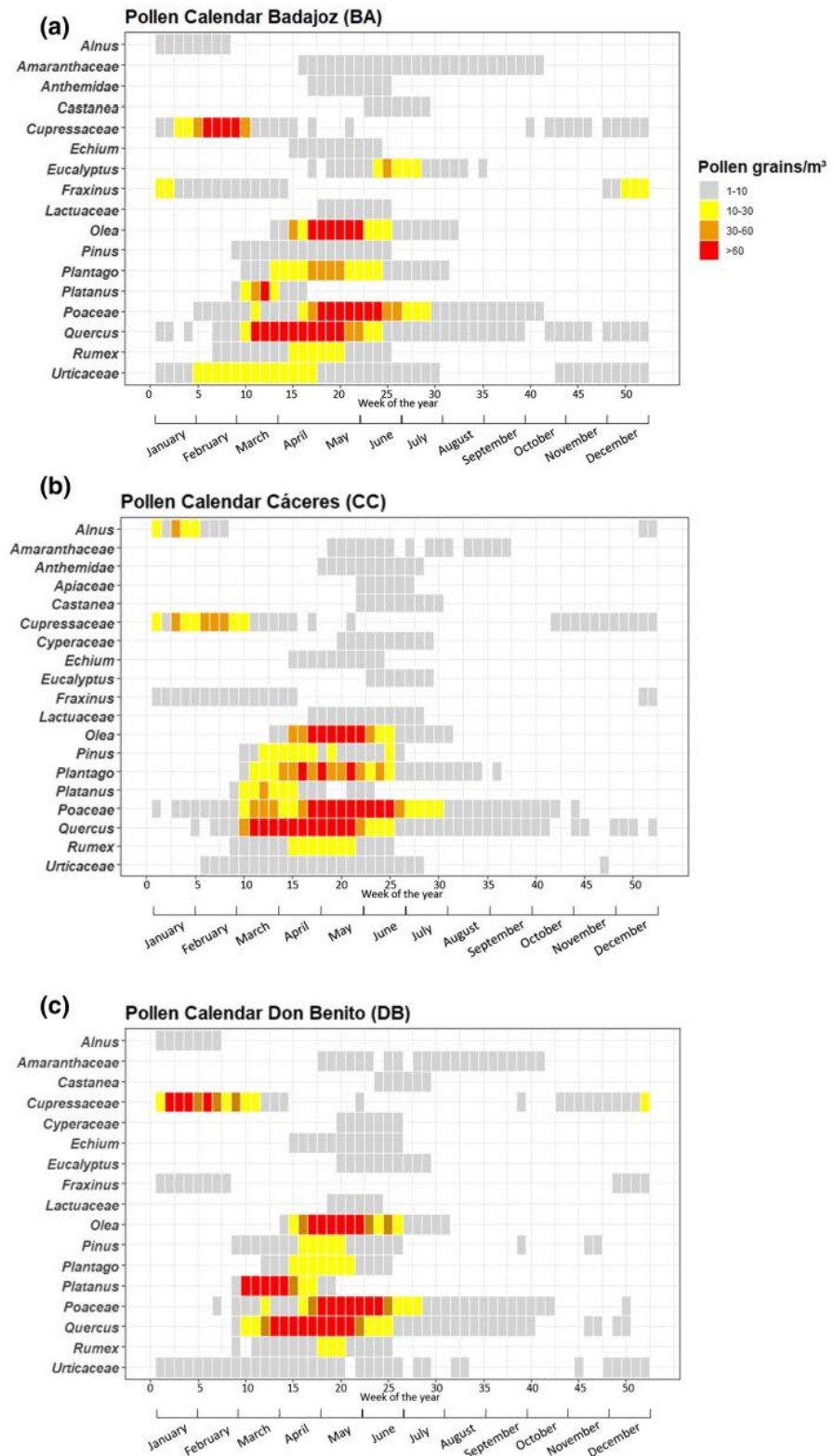
Considering the pollen types that exceeded the threshold of 60 pollen grains/m³, the weeks that presented the highest concentrations were as follows: in BA, weeks 6–9 for Cupressaceae, 18–24 for Poaceae, 11–20 for *Quercus* and 17–22 for *Olea*; in CC, weeks 17–25 for Poaceae, 11–25 for *Quercus*, 16, 18 and 21 for *Plantago* and 17–22 for *Olea*; in DB, weeks 2, 3, 4 and 6 for Cupressaceae, 18–24 for Poaceae, 10–14 for *Platanus*, 13–21 for *Quercus* and 17–22 for *Olea*; in PL, 19–23 for Poaceae, 13–22 for *Quercus* and 19–22 for *Olea*; and in ZA, weeks 7 and 10 for Cupressaceae, 18–22 for Poaceae, 13–20 for *Quercus* and 17–23 for *Olea*.

3.3 Regional gradients

Figures 3 (*Olea*), 4 (Cupressaceae), 5 (*Platanus*), 6 (*Quercus*) and 7 (Poaceae) represent the data with colour gradients (Sect. 2.5). These figures represent the parameters of the start date (a), peak date (b) end date (c), pollination duration (d) and SPIn (e).

The results for *Olea*, *Platanus* and *Quercus* show that the start date occurs latest in PL, in the north of the Extremadura region, and this city shows the second latest start date for Poaceae and the third latest start date for Cupressaceae. Furthermore, the start dates for *Olea*, *Quercus* and Poaceae are earliest in DB, in east of the region, while the start dates of Cupressaceae and *Platanus* are earliest in BA, to the west. The peak date occurs later in PL, in the north of the region, for the *Olea*, *Platanus*, *Quercus* and Poaceae pollen types, while it occurs earlier in cities such as BA (*Olea* and

Fig. 2 Pollen calendars of Badajoz (a), Cáceres (b), Don Benito (c), Plasencia (d) and Zafra (e)



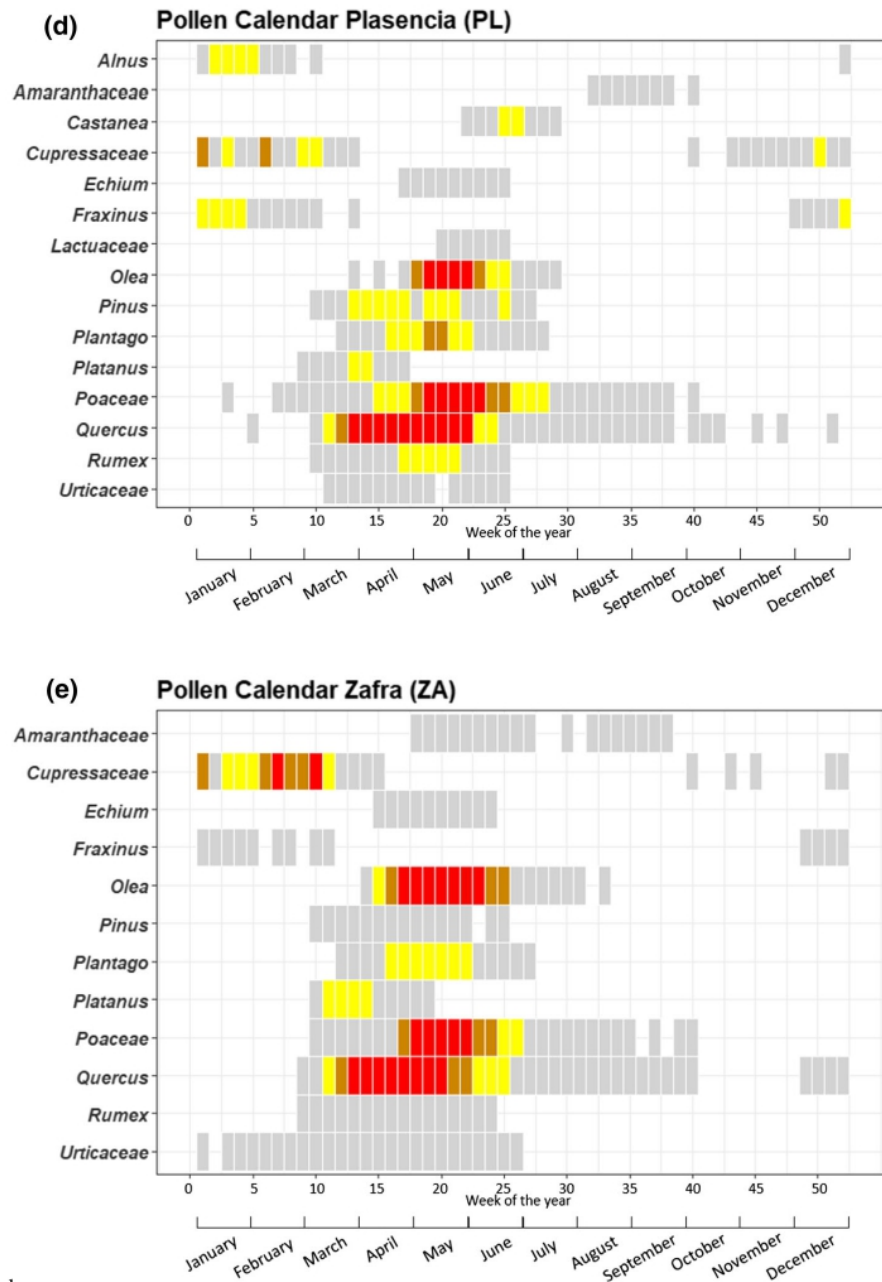


Fig. 2 continued

Platanus), ZA (*Quercus*) and DB (*Poaceae*), in the south.

On the other hand, the end date occurs latest in the city of DB, in the east, for *Olea*, *Quercus* and *Poaceae*, followed by Badajoz for *Quercus* and *Poaceae*; both of these cities are located in the southern region. The pollination duration is longest in DB for *Olea*, *Quercus* and *Poaceae*, in the east, followed by BA,

for these three types of pollen; both of these cities are located in the southern province of the region. Regarding the SPIn for the 5 cities and the 5 types of pollen (*Olea*, *Cupressaceae*, *Platanus*, *Quercus* and *Poaceae*), PL is the city with the lowest SPIn for 3 (*Olea*, *Cupressaceae* and *Platanus*) of the 5 types of pollen, followed by CC for 2 types of pollen (*Olea* and

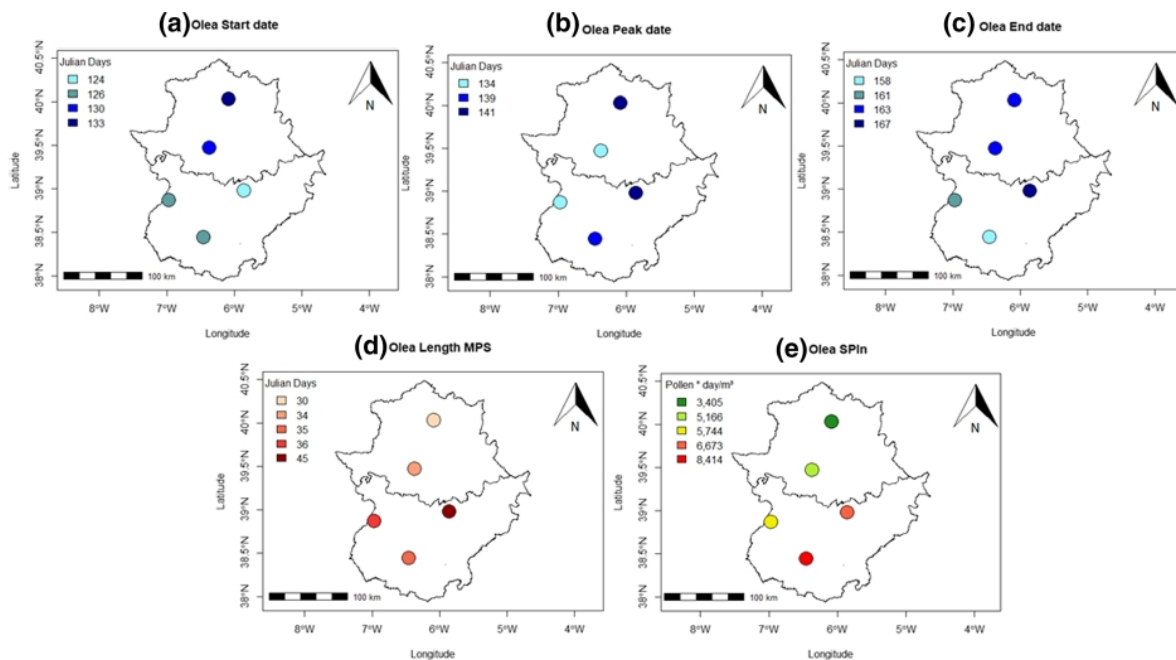


Fig. 3 Colour gradient maps for *Olea* pollen with the start date (a), peak date (b), end date (c), pollination length (d) and SPIn (e) of the studied cities (Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra)

Cupressaceae); both of these cities are located in the northern part of Extremadura.

4 Discussion

The studied cities (BA, CC, DB, PL and ZA) were selected as a compromise between the number of populations affected (31% of the total in the region), the geographical situation (Table 1) and the ability to reflect a number of different landscapes presented across the region of Extremadura (NSI 2019).

In the cities of the Extremadura region, more than 60 different pollen types were collected, among which the most abundant belonged to *Quercus*, Poaceae, *Olea*, Cupressaceae, *Platanus* (these 5 taxa were further evaluated by using colour gradient maps), *Plantago* and *Pinus*. Among all pollen types collected in Extremadura, less than half showed a significant APIn; some authors refer to these types of pollen as the MPTs (major pollen types), defined according to showing concentrations ≥ 100 pollen \cdot day/ m^3 , which have been the pollen types included in the calendars for the Extremadura region (Elvira-

Rendueles et al. 2019). The city of Extremadura that showed the greatest number of MPTs that exceeded this threshold was CC (19), followed by BA and DB (17), PL (15) and, finally, ZA (12). These values are in line with the pollen types considered to be of greater importance due to their concentrations in other Spanish cities, such as Salamanca (12), Sevilla (13), and Málaga (12), and are somewhat higher than those obtained in Córdoba (10) (Martínez-Bracero et al. 2015; Rodríguez-de la Cruz et al. 2010). It is worth mentioning that the two cities with the lowest number of MPTs, PL and ZA, are located in two of the most mountainous areas in Extremadura. Some authors have studied the effect of altitude on plant growth because it induces phenological changes provoked by micrometeorological conditions (Dai et al. 2014; Pellerin et al. 2012).

The pollen types that exceeded the maximum threshold established in the calendar (> 60 pollen grains/ m^3) for the 5 studied cities were *Quercus*, *Olea* and Poaceae (Fig. 2). The sources of these pollen types are very abundant in the region, which together with their medium- and long-distance distribution, could have influenced the very high concentrations

found in the urban areas (Dominguez et al. 1993; Fernández-Rodríguez et al. 2018a; Maya-Manzano et al. 2016). These pollen types showing the highest abundance in cities of Extremadura are similar to those found in Salamanca, where the most abundant pollen group is *Quercus*, followed by Poaceae; in Huelva, where the most abundant group is Poaceae, followed by *Quercus*; and in Évora, where the *Quercus* pollen type is the most abundant, followed by Poaceae (Camacho et al. 2017; Martínez-Bracero et al. 2015; Rodríguez-de la Cruz et al. 2010).

Quercus pollen is present in the Extremadura region throughout almost the entire year in the city of BA; however, in the other cities, it does not usually appear in winter. This could be due to the difference in annual rainfall between the cities, since Badajoz is the city with the lowest accumulated rainfall (Table 1), and pollen grains could therefore remain in the air for a longer period; BA also exhibits the highest mean temperature of 17 °C and presents mild winters that could facilitate early flowering. *Quercus* pollen is the most abundant pollen type in the studied cities, with an average MPS duration between 58 (PL) and 81 (DB) days. These high concentrations are mainly due to the large number of specimens in the region and the large amounts of pollen released by some of their taxa (Maya-Manzano et al. 2016; Tormo-Molina et al. 1996). Poaceae pollen appears at low concentrations from late winter to late summer. Its maximum intensity occurs in spring, after which its presence is reduced in the last week of July. In autumn and most of the winter, this type of pollen is almost non-existent. The duration of its pollen season (MPS) varies greatly from one city to another, with ZA showing the shortest (63 days) and DB the longest (118 days) (Table 2). The mean temperature recorded throughout the year is also highest in DB (DB and BA are located on lower plains than the other cities), at 17.1 °C, and lowest in ZA, at 15.8 °C (Table 2). This dependence on temperatures controlling the start of the Poaceae pollen season has been previously reported by other authors (García-Mozo et al. 2009; Pauling et al. 2014). Another important point is that the surroundings of DB are used at pastures, supporting a considerable number of species that extend the MPS over a longer period. The difference in land cover could explain why in spite of being characterized by the same mean temperature, *Quercus* was not as important a pollen component in DB as it was in other cities, such as BA

and CC. *Olea* was another important pollen type in the Extremadura region, being the second most abundant taxon in ZA and DB. This could be due to land uses in these areas, since olive groves are one of the main land uses in Zafra (Table 1), which is also the city with the highest API_n among the studied cities (Table 2). This pollen type appeared a considerable concentration from the first weeks until the end of spring. The duration of the MPS ranged from 30 days in PL to 45 days in DB (Table 2). We cannot discard the possibility of episodic long-distance transport of *Olea*, as Extremadura is located close to Portugal and Andalusia, and these two regions contain considerable areas covered by olive crops. In the region, such episodes have been frequently reported (Fernández-Rodríguez et al. 2014a, b; Fernández-Rodríguez et al. 2020; Monroy-Colín et al. 2020).

Other important pollen types in the Extremadura region include Cupressaceae, *Platanus* and *Plantago* in terms of their concentration and allergenicity (SEAIC 2017). Cupressaceae was also identified as an important pollen type in the Extremadura region in the present study, especially in the cities of BA, DB and ZA, where it exceeds the maximum threshold established in the calendar. Cupressaceae was the pollen type that appeared first according to the pollen calendars (Fig. 2a–e), with BA, DB and ZA showing the highest concentrations (Table 2). The five cities presented high values in the winter period. In Toledo, Huelva, Sevilla and Évora, similar patterns are observed regarding the dates at which the highest values occur (Camacho et al. 2017; Martínez-Bracero et al. 2015; Pérez-Badia et al. 2010). *Platanus* exhibited the highest concentrations in DB, where it exceeded their levels in the other studied cities of Extremadura by up to 7 times. However, it reaches its maximum levels in the pollen calendar of BA and showed levels close to those maximum values in CC. The duration of high concentrations of *Platanus* pollen in the air was only 2 or 3 weeks in most cities except for DB, where it was up to 6 weeks. Finally, *Plantago* showed a higher pollen concentration in CC, where it reached the maximum concentration with respect to calendar threshold and was 2 times higher than that of Badajoz, which also presented a significant concentration, and 4 times higher than those in DB, PL and ZA.

These six pollen types are among the most important in the Extremadura region, not only because of

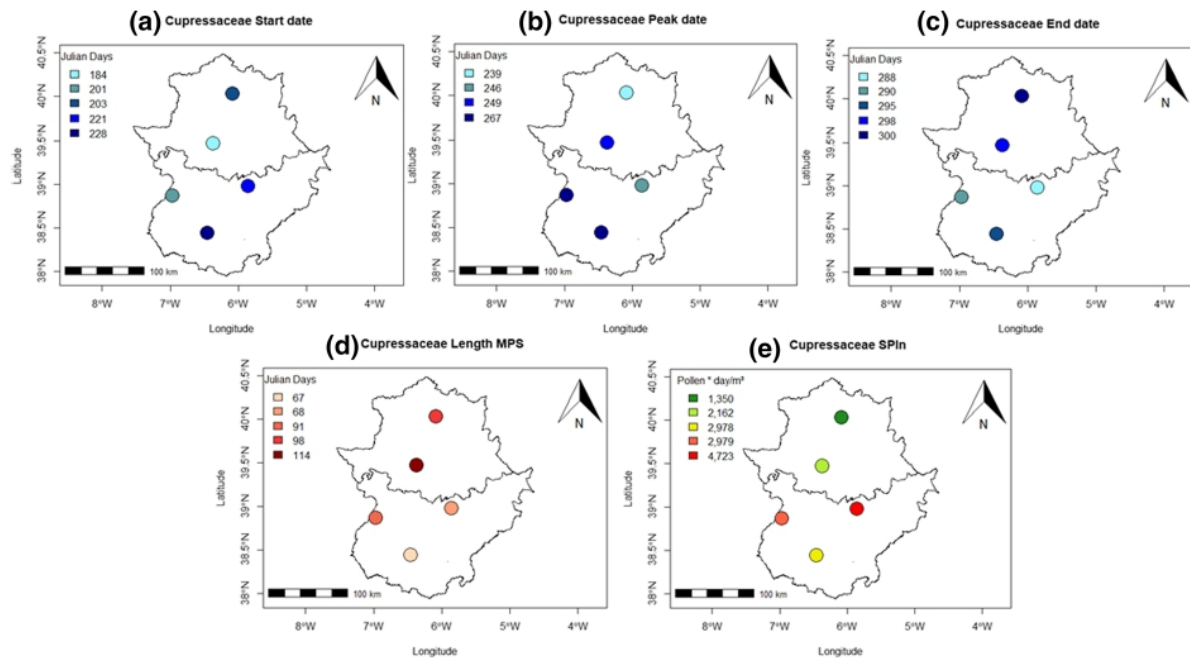


Fig. 4 Colour gradient maps for Cupressaceae pollen with the start date (a), peak date (b), end date (c), pollination length (d) and SPIn (e) of the studied cities (Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra)

their abundance but also because they are among the most allergenic pollen types (Cariñanos et al. 2014; Charpin et al. 2005) (SEAIC 2017). Other types of pollen collected in the cities that appeared at lower concentrations were also included in the pollen calendars (Fig. 2).

The differences between the cities in terms of the presence of different pollen types in the air and the concentrations and times of year at which they occur depend on various factors. In some cases, these differences are due to the wide variety of species included within a pollen type, as is the case for Cupressaceae and Poaceae (Boi and Llorens 2013; Galán et al. 1989; Wang et al. 2013). They may also be due to the proximity of the sources to pollen grains from sources separated by medium–long distances and the number of specimens that can be located near the samplers. For example, Cupressaceae is a pollen type for which local sources have an important influence, as this family is widely used in urban areas as ornamental plants in either public or private gardens (Caiaffa et al. 1993). These local sources could exert the main influence in the cities of Extremadura, since DB was the city with the largest number of specimens located close to the sampler and the city with the highest SPIn

for Cupressaceae (Table 2 and Fig. 4e). Ornamental trees belonging to *Platanus* are also widely used in parks and gardens, and the genus is therefore associated with urban areas (Alcázar et al. 2011). It was especially relevant in DB, where the airborne concentrations of *Platanus* were over-represented due to the number of mature individuals located close to the trap, showing the second highest SPIn in this city (Table 2 and Fig. 5e). *Quercus* shows differences due mainly to land cover, the proximity and the number of sources from which the pollen is produced and the influence of local meteorology, including the effect of distant air masses containing aerobiological particles from potential sources (González-Naharro et al. 2019; Maya-Manzano et al. 2016). Salamanca, Huelva and Évora are cities near the Extremadura region that can be reached by *Quercus* pollen from the Extremadura region and vice versa, thus explaining their high concentrations (Martínez-Bracero et al. 2015; Rodríguez-de la Cruz et al. 2010). Extremadura shows high coverage of *Quercus* and includes areas of pastureland and mountains where there are a large number of sources of this pollen type (Maya-Manzano et al. 2016). Moreover, the pollen concentrations produced by ornamental sources such as Cupressaceae and

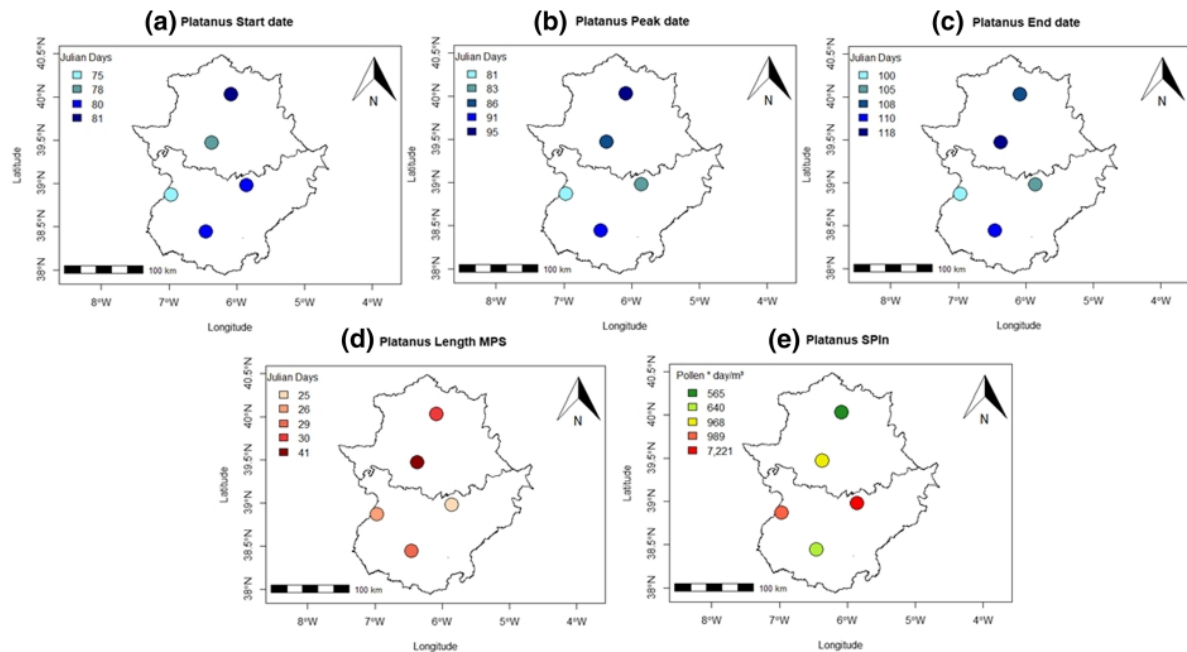


Fig. 5 Colour gradient maps for *Platanus* sp. pollen with the start date (a), peak date (b), end date (c), pollination length (d) and SPIn (e) of the studied cities (Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra)

Platanus also vary due to other factors related to management, such as irrigation, disease and pest treatments or pruning, and the proximity of these sources to the sampler (Maya-Manzano et al. 2017a, b).

The presence of pollen grains in the air is highly dependent on the vegetation and substrates available, land use changes, the introduction of ornamental species into green spaces, weather conditions (which are important for the production, release and dispersal of pollen from the source) and the altitude at which the sources are located (Cristofori et al. 2010; Gonzalo-Garijo et al. 2006; Sharma et al. 2012; Singh et al. 2017; Tormo et al. 2013; Zewdie et al. 2019). All of these variables are influenced by latitude, associated with indicators such as temperature and daylight hours (Lo et al. 2019). In Extremadura, latitude could be important in determining the pollination periods of some types of pollen occurring in natural landscapes, such as *Quercus* and *Olea*. However, longitude did not seem to have as much influence in the results, since the greatest distance between any two cities was between BA and DB, which are only approximately 96 km apart. Nevertheless, we can mention that *Olea*,

Quercus and *Poaceae* (the three that did not depend on management or pruning, but only natural vegetation) did start first their MPS in the east side of Extremadura. It could be provoked also by medium-long-distance transport from other places as Andalusia, as has been discussed previously.

Table 2 indicates the start of the *Quercus* pollen season, which was earlier in the southern part of the region than in the North and reached its maximum peak earlier in the South than in the North (Fig. 6b and Table 2). Similar trends can be observed in CC, Huelva and Córdoba, which are located farther south, or in Salamanca, which is located farther north. We observed that the peak occurred in Huelva at the end of March, in Córdoba on 2 April, in CC on 10 April and in Salamanca on 27 May (Martínez-Bracero et al. 2015; Rodríguez-de la Cruz et al. 2010). Lo et al. (2019) noted that the *Quercus* pollen season starts later at higher latitudes, which was also observed in Extremadura considering that the city where the *Quercus* pollen season begins last is PL.

Olea pollination is also influenced by latitude. In Extremadura, pollination begins earlier in cities located farther south in the region (DB, ZA and BA)

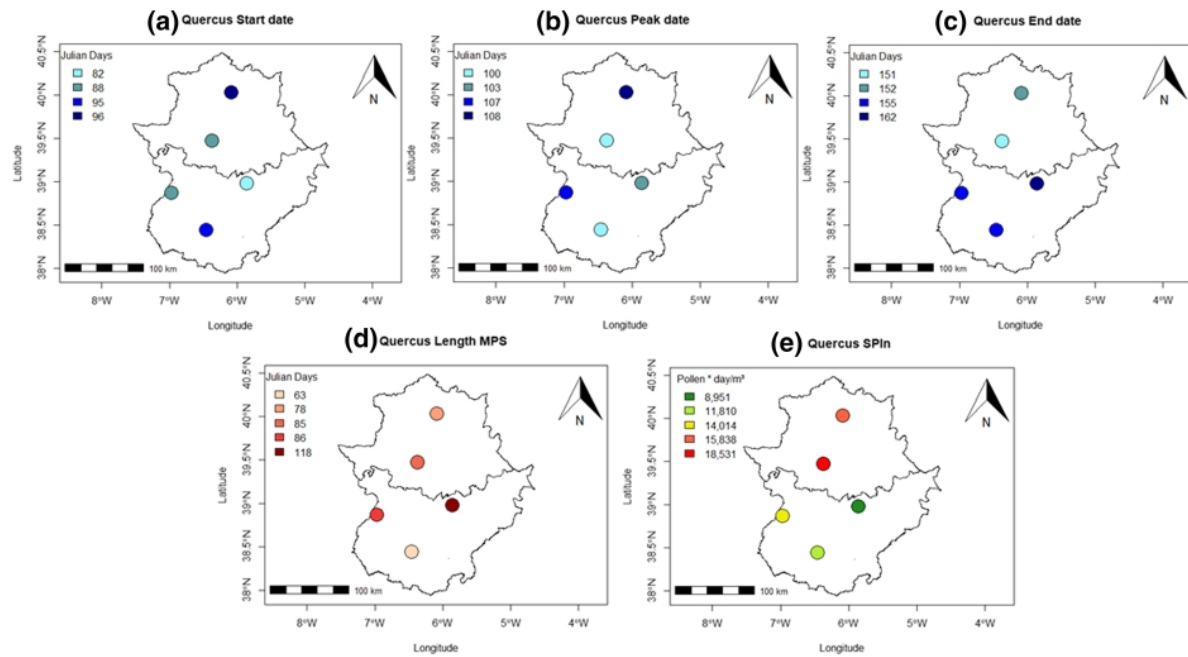


Fig. 6 Colour gradient maps for *Quercus* pollen with the start date (a), peak date (b), end date (c), pollination length (d) and SPIn (e) of the studied cities (Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra)

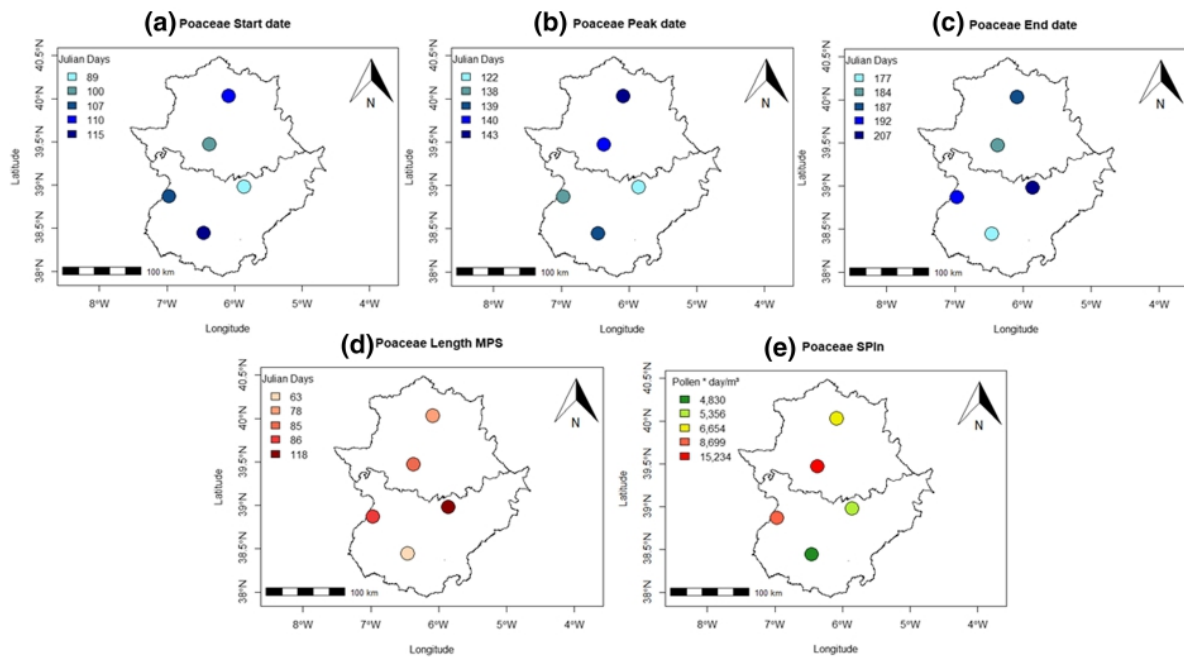


Fig. 7 Colour gradient maps for *Poaceae* pollen with the start date (a), peak date (b), end date (c), pollination length (d) and SPIn (e) of the studied cities (Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia and Zafra)

than in PL, the most northern city of Extremadura (Fig. 3a and Table 2). These regarding the influence of latitude are in agreement with those obtained by Aguilera et al. (2015).

The geographical coloured gradient maps (Figs. 3, 4, 5, 6, 7) show the geolocations of the pollen calendars (Lo et al. 2019) and provide information on the main MPS parameters, such as the start, peak and end dates, the duration of the pollination period and SPIn. Therefore, this kind of tool can be used as an aerobiological information source that provides information in a quick, easy, visual manner. These tools display information using regional colour gradients, which together with aerobiological risk maps created with local colour gradients and pollen calendars allow the risks, distribution and aerobiological concentration in certain places to be visualized and understood, thus aiding in the treatment of disease in allergic patients and the prevention and control of allergies and the development of diagnostic tests by medical doctors (Aguilera et al. 2015; Katotomichelakis et al. 2015; Lo et al. 2019; Pecero-Casimiro et al. 2019).

5 Conclusions

Pollen calendars for Extremadura show some degree of diversity between cities, with variations in both the pollen spectrum and concentrations. This is due in part to the variety of urban species used as ornamental plants, their locations in relation to pollen traps and the influence of peri-urban landscapes that contain natural vegetation and crops. In addition to nearby vegetation, medium- and long-distance transport influences the pollen spectrum, particularly in the case of *Quercus* and *Olea*.

Pollen calendars are related to the regional nature of plant ecology and climate in different locations. Latitude is an indicator of temperature and the daylight duration, so it can influence plant phenology. In this study, there seemed to be indications that latitude influences the start date of several of the pollen types studied, such as *Olea*, *Quercus* and *Platanus*, in Extremadura. In addition, it influences the peak date for *Olea*, *Platanus*, *Quercus* and *Poaceae* and the duration of the pollen season. The two cities within mountainous areas (PL and ZA) showed a lower number of pollen types classified as MPTs. However, longitude did not show as much remarked

influence on the aerobiological characteristics of the cities, although *Quercus*, *Olea* and *Poaceae*, which do not depend on human management as *Platanus* or *Cupressaceae*, started first their MPS in the east side of the region.

The representation and geolocation of pollen calendars using geographic gradients represented by colours provide information on the patterns of certain taxa in cities in a quick, simple, visual manner. This information can be of great interest to allergy patients and healthcare professionals, allowing them to implement preventive measures and administer treatments to patients.

Acknowledgements This work was possible by funds from research projects IB16029 and research group said GR18113 financed by the Regional Government, Junta de Extremadura (Spain) and FEDER. Particularly, the National Commission of Science and Technology of Mexico (CONACyT) funds to A.M.C.

References

- AEMET. (2020). Valores climatológicos normales: Badajoz Aeropuerto - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España, 2020.
- Aguilera, F., Dhiab, A. B., Msallem, M., Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruiz-Valenzuela, L., et al. (2015). Airborne-pollen maps for olive-growing areas throughout the Mediterranean region: spatio-temporal interpretation. *Aerobiologia*, 31, 421–434. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9375-5>.
- Alcázar, P., García-Mozo, H., Trigo, M. D. M., Ruiz, L., González-Minero, F. J., Hidalgo, P., et al. (2011). *Platanus* pollen season in Andalusia (southern Spain): Trends and modeling. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 2502–2510. <https://doi.org/10.1039/c1em10355e>.
- Boi, M., & Llorens, L. (2013). Annual pollen spectrum in the air of Palma de Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Aerobiologia*, 29, 385–397. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9288-0>.
- Caiaffa, M. F., Macchia, L., Strada, S., Barileto, G., Scarpelli, F., & Tursi, A. (1993). Airborne *Cupressaceae* pollen in Southern Italy. *Annals of Allergy*, 71, 45–50.
- Camacho, I. C., Caeiro, E., Ferro, R., Camacho, R., Câmara, R., Grimm-Gofroñ, A., et al. (2017). Spatial and temporal variations in the Annual Pollen Index recorded by sites belonging to the Portuguese Aerobiology Network. *Aerobiologia*, 33, 265–279. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9468-9>.
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., & Quesada-Rubio, J. (2014). Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 123, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009>.

- Charpin, D., Calleja, M., Lahoz, C., Pichot, C., & Waisel, Y. (2005). Allergy to cypress pollen. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 60, 293–301. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2005.00731.x>.
- Cristofori, A., Cristofolini, F., & Gottardini, E. (2010). Twenty years of aerobiological monitoring in Trentino (Italy): Assessment and evaluation of airborne pollen variability. *Aerobiologia*, 26, 253–261. <https://doi.org/10.1007/s10453-010-9161-3>.
- Csépe, Z., Leelőssy, Á., Mányoki, G., Kajtor-Apatini, D., Udvardy, O., Péter, B., et al. (2019). The application of a neural network-based ragweed pollen forecast by the Ragweed Pollen Alarm System in the Pannonian biogeographical region. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09615-w>.
- Cuevas, E., Vianna, J. A., Botero-Delgadillo, E., Doussang, D., González-Acuña, D., Barroso, O., et al. (2020). Latitudinal gradients of haemosporidian parasites: Prevalence, diversity and drivers of infection in the Thorn-tailed Rayadito (*Aphrastura spinicauda*). *IJP: Parasites and Wildlife*, 11, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2019.11.002>.
- Dai, J., Wang, H., & Ge, Q. (2014). The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China. *International Journal of Biometeorology*, 58, 521–528.
- D'amato, G., & Spiekma, F. T. M. (1992). European allergenic pollen types. *Aerobiologia*, 8, 447–450. <https://doi.org/10.1007/BF02272914>.
- De Weger, L. A., Bergmann, K. C., Rantio-Lehtimäki, A., Dahl, A., Buters, J., Déchamp, C., et al. (2013). Impact of pollen. *Allergenic pollen: A review of the production, release, distribution and health impacts*, 9789400748811, 161–215. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4881-1_6.
- Dominguez, Vilches E., Infante, Garcia-Pantaleon F., Galan, Soldevilla C., Guerra, Pasadas F., & Villamandos De La Torre, F. (1993). Variations in the concentrations of airborne Olea pollen and associated pollinosis in Cordoba (Spain): A study of the 10-year period 1982-1991. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 3, 121–129.
- Elvira-Rendueles, B., Moreno, J. M., Costa, I., Bañón, D., Martínez-García, M. J., & Moreno-Grau, S. (2019). Pollen calendars of Cartagena, Lorca, and Murcia (Region of Murcia), southeastern Iberian Peninsula: 2010–2017. *Aerobiologia*, 35, 477–496. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09578-y>.
- Fernández, J. (1992). Allergenic activity of date palm (Phoenix dactylifera) pollen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 89, 148.
- Fernández-Rodríguez, S., Cortés-Pérez, J. P., Muriel, P. P., Tormo-Molina, R., & Maya-Manzano, J. M. (2018a). Environmental impact assessment of Pinaceae airborne pollen and green infrastructure using BIM. *Automation in Construction*, 96, 494–507. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.011>.
- Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., Gonzalo-Garijo, Á., et al. (2018b). Environmental assessment of allergenic risk provoked by airborne grass pollen through forecast model in a Mediterranean region. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1304–1315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.226>.
- Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J. M., Colín, A. M., Pecero-Casimiro, R., Buters, J., & Oteros, J. (2020). Understanding hourly patterns of Olea pollen concentrations as tool for the environmental impact assessment. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139363>.
- Fernández-Rodríguez, S., Skjøth, C. A., Tormo-Molina, R., Brandao, R., Caeiro, E., Silva-Palacios, I., et al. (2014a). Identification of potential sources of airborne Olea pollen in the Southwest Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology*, 58, 337–348. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0629-4>.
- Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., Silva-Palacios, I., & Gonzalo-Garijo, Á. (2014b). Comparative study of the effect of distance on the daily and hourly pollen counts in a city in the south-western Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 30, 173–187. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9316-0>.
- Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M., Clot, B., Crouzy, B., Dahl, A., et al. (2017). Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia*, 33, 293–295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>.
- Galán C., Cariñanos P., Alcázar P., & Dominguez-Vilches E. (2007). Spanish Aerobiology Network (REA) Management and Quality Manual. Servicio de Publicaciones Universidad de Córdoba.
- Galán, C., Cuevas, J., Infante, F., & Domínguez, E. (1989). Seasonal and diurnal variation of pollen from Gramineae in the atmosphere of Córdoba Spain. *Allergologia et Immunopathologia*, 17, 245–249.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., et al. (2014). Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30, 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>.
- García-Mozo, H., Galán, C., Belmonte, J., Bermejo, D., Candau, P., Díaz de la Guardia, C., et al. (2009). Predicting the start and peak dates of the Poaceae pollen season in Spain using process-based models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.08.013>.
- González-Naharro, R., Quirós, E., Fernández-Rodríguez, S., Silva-Palacios, I., Maya-Manzano, J. M., Tormo-Molina, R., et al. (2019). Relationship of NDVI and oak (Quercus) pollen including a predictive model in the SW Mediterranean region. *Science of the Total Environment*, 676, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.213>.
- Gonzalo-Garijo, M. A., Tormo-Molina, R., Muñoz-Rodríguez, A. F., & Silva-Palacios, I. (2006). Differences in the spatial distribution of airborne pollen concentrations at different urban locations within a city. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 16, 37–43.
- Grégori, M., Schmitt, J. P., Pallarès, C., Rozenfarb, D., Pautz, F., Astafieff, K., et al. (2019). Pollin'air: un réseau de citoyens au service des personnes allergiques. *Revue Française d'Allergologie*, 59, 533–542. <https://doi.org/10.1016/j.reval.2019.09.004>.
- Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 257–265.
- Katotomichelakis, M., Nikolaidis, C., Makris, M., Zhang, N., Aggelides, X., Constantinidis, T. C., et al. (2015). The clinical significance of the pollen calendar of the Western

- Thrace/northeast Greece region in allergic rhinitis. *International Forum of Allergy and Rhinology*, 5, 1156–1163. <https://doi.org/10.1002/alr.21623>.
- Lo, F., Bitz, C. M., Battisti, D. S., & Hess, J. J. (2019). Pollen calendars and maps of allergenic pollen in North America. *Aerobiologia*, 35, 613–633. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09601-2>.
- Martínez-Bracero, M., Alcázar, P., Díaz de la Guardia, C., González-Minero, F. J., Ruiz, L., Trigo Pérez, M. M., et al. (2015). Pollen calendars: A guide to common airborne pollen in Andalusia. *Aerobiologia*, 31, 549–557. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9385-3>.
- Maya-Manzano, J. M., Tormo, Molina R., Fernández, Rodríguez S., Silva, Palacios I., & Gonzalo, Garijo Á. (2017). Distribution of ornamental urban trees and their influence on airborne pollen in the SW of Iberian Peninsula. *Land-scape and Urban Planning*, 157, 434–446. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.011>.
- Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., & Gonzalo-Garijo, Á. (2017a). Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>.
- Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, Á., & Tormo-Molina, R. (2018). Comparison between two adhesives (silicone and petroleum jelly) in Hirst pollen traps in a controlled environment. *Grana*, 57(1–2), 137–143.
- Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Smith, M., Tormo-Molina, R., Reynolds, A. M., Silva-Palacios, I., et al. (2016). Airborne Quercus pollen in SW Spain: Identifying favourable conditions for atmospheric transport and potential source areas. *Science of the Total Environment*, 571, 1037–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.094>.
- Maya-Manzano, J. M., Sady, M., Tormo-Molina, R., Fernández-Rodríguez, S., Oteros, J., Silva-Palacios, I., et al. (2017b). Relationships between airborne pollen grains, wind direction and land cover using GIS and circular statistics. *Science of the Total Environment*, 584–585, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.085>.
- Monroy-Colín, A., Maya-Manzano, J. M., Tormo-Molina, R., Pecero-Casimiro, R., Gonzalo-Garijo, M. Á., & Fernández-Rodríguez, S. (2020). HYSPLIT as an environmental impact assessment tool to study the data discrepancies between Olea europaea airborne pollen records and its phenology in SW Spain. *Urban Forestry and Urban Greening*. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126715>.
- Nilsson, S., & Persson, S. (1981). Tree pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973–1980. *Grana*, 20, 179–182. <https://doi.org/10.1080/00173138109427661>.
- NSI N.S.I. (2019). Cifras oficiales de población de los municipios españoles, 2019.
- O'Rourke, M. K. (1990). Comparative pollen calendars from Tucson, Arizona: Durham vs. Burkard samplers. *Aerobiologia*, 6, 136–140. <https://doi.org/10.1007/BF02539105>.
- Oteros, J., Bergmann, K., Menzel, A., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C. B., et al. (2019). Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmospheric Environment*, 199, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.045>.
- Pauling, A., Gehrig, R., & Clot, B. (2014). Toward optimized temperature sum parameterizations for forecasting the start of the pollen season. *Aerobiologia*, 30, 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9308-0>.
- Pawankar, R. (2014). Allergic diseases and asthma: A global public health concern and a call to action. *World Allergy Organization Journal*. <https://doi.org/10.1186/1939-4551-7-12>.
- Pecero-Casimiro, R., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Cortés-Pérez, J. P., et al. (2019). Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.382>.
- Pellerin, M., Delestrade, A., Mathieu, G., Rigault, O., & Yoccoz, N. G. (2012). Spring tree phenology in the Alps: Effects of air temperature, altitude and local topography. *European Journal of Forest Research*, 131, 1957–1965.
- Pérez-Badía, R., Rapp, A., Morales, C., Sardinero, S., Galán, C., & García-Mozo, H. (2010). Pollen spectrum and risk of pollen allergy in central Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 17, 139–151.
- R Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: Austria.
- Rodríguez-de la Cruz, D., Sánchez-Reyes, E., Dávila-González, I., Lorente-Toledano, F., & Sánchez-Sánchez, J. (2010). Airborne pollen calendar of Salamanca, Spain, 2000–2007. *Allergology and Immunopathology (Allergologia et Immunopathologia)*, 38, 307–312. <https://doi.org/10.1016/j.aller.2010.04.001>.
- Rojo, J., Picornell, A., & Oteros, J. (2019). AeRobiology: The computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1371–1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13203>.
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Fernández-González, F., & Pérez-Badía, R. (2015). Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Science of the Total Environment*, 538, 672–682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.074>.
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Sabariego, S., Fernández-González, F., & Pérez-Badía, R. (2016). Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>.
- SEAIC. (2017). Alergológica 2015. Retrieved December 22, 2019, from <http://www.seaic.org/profesionales/alergologica-2015>.
- Sharma, C. M., Khanduri, V. P., & Ghildiyal, S. K. (2012). Reproductive ecology of male and female strobili and mating system in two different populations of Pinus roxburghii. *Scientific World Journal*, 2012, 271389. <https://doi.org/10.1100/2012/271389>.
- Šikoparija, B., Marko, O., Panic, M., Jakovetic, D., & Radišić, P. (2018). How to prepare a pollen calendar for forecasting daily pollen concentrations of Ambrosia, Betula and

- Poaceae. *Aerobiologia*, 34, 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9507-9>.
- Silva, Palacios I., Silva, Palacios I., Tormo, Molina R., Tormo, Molina R., Muñoz, Rodríguez A., & Muñoz, Rodríguez A. (2007). The importance of interactions between meteorological conditions when interpreting their effect on the dispersal of pollen from homogeneously distributed sources. *Aerobiologia*, 23, 17–26. <https://doi.org/10.1007/s10453-006-9041-z>.
- Singh, N., Singh, U., Singh, D., Daya, M., & Singh, V. (2017). Correlation of pollen counts and number of hospital visits of asthmatic and allergic rhinitis patients. *Lung India*, 34, 127–131. <https://doi.org/10.4103/0970-2113.201313>.
- Smith, M., Skjøth, C. A., Myszkowska, D., Uruska, A., Puc, M., Stach, A., et al. (2008). Long-range transport of Ambrosia pollen to Poland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1402–1411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.04.005>.
- Spieksma, F. T. M. (1991). Regional European pollen calendar. In G. D'Amato, F. T. M. Spieksma, & S. Bonini (Eds.), *Allergenic Pollen and Pollinosis in Europe*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Sung, M., Kim, S. W., Kim, J. H., & Lim, D. H. (2017). Regional difference of causative pollen in children with allergic rhinitis. *Journal of Korean Medical Science*, 32, 926–932. <https://doi.org/10.3346/jkms.2017.32.6.926>.
- Tormo, Molina R., Maya Manzano, J. M., Fernández, Rodríguez S., Gonzalo Garijo, Á., & Silva, Palacios I. (2013). Influence of environmental factors on measurements with Hirst spore traps. *Grana*, 52, 59–70. <https://doi.org/10.1080/00173134.2012.718359>.
- Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J., Silva-Palacios, I., Fernández-Rodríguez, S., & Gonzalo-Garijo, Á. (2015). Flower production and phenology in *Dactylis glomerata*. *Aerobiologia*, 31, 469–479. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9381-7>.
- Tormo-Molina, R., Rodríguez, A. M., Silva-Palacios, I., & López, F. G. (1996). Pollen production in anemophilous trees. *Grana*, 35, 38–46. <https://doi.org/10.1080/00173139609430499>.
- Walk, J., Stauch, G., Meyers, M., Vásquez, P., Sepúlveda, F. A., Bartz, M., et al. (2020). Gradients in climate, geology, and topography affecting coastal alluvial fan morphodynamics in hyperarid regions—The Atacama perspective. *Global and Planetary Change*, 185, 102994. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102994>.
- Wang, Q., Nakamura, S., Lu, S., Nakajima, D., Suzuki, M., Sekiguchi, K., et al. (2013). Diurnal and nocturnal behaviour of airborne *Cryptomeria japonica* pollen grains and the allergenic species in urban atmosphere of saitama, Japan. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7, 65–71. <https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.2.065>.
- Werchan, M., Werchan, B., & Bergmann, K. (2018). German pollen calendar 4.0—update based on 2011–2016 pollen data. *Allergo Journal International*, 27, 69–71. <https://doi.org/10.1007/s40629-018-0055-1>.
- Zewdie, G. K., Lary, D. J., Liu, X., Wu, D., & Levetin, E. (2019). Estimating the daily pollen concentration in the atmosphere using machine learning and NEXRAD weather radar data. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7542-9>.

Capítulo II

Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees
using a new index based on LiDAR and Kriging: A case
study of plane trees

5.4. Capítulo II: Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees.

Science of the Total Environment 693 (2019) 133576



Contents lists available at ScienceDirect
Science of the Total Environment
 journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees



Raúl Pecero-Casimiro^a, Santiago Fernández-Rodríguez^b, Rafael Tormo-Molina^a,
 Alejandro Monroy-Colín^a, Inmaculada Silva-Palacios^c, Juan Pedro Cortés-Pérez^b,
 Ángela Gonzalo-Garijo^d, José María Maya-Manzano^{e,*}

^a Department of Plant Biology, Ecology and Earth Sciences, Faculty of Science, University of Extremadura, Avda. Elvas s/n, Badajoz, Spain

^b Department of Construction, School of Technology, University of Extremadura, Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, Spain

^c Department of Applied Physics, Engineering Agricultural School, University of Extremadura, Avda. Adolfo Suárez s/n, Badajoz, Spain

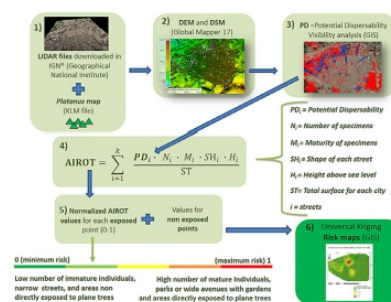
^d Department of Allergology, University Hospital Complex Badajoz, Avda. Elvas s/n, Badajoz, Spain

^e School of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Technological University Dublin, Kevin Street, D08 X622, Dublin, Ireland

HIGHLIGHTS

- An Aerobiological Index studying the risk provoked by ornamental trees is proposed.
- AIROT uses LiDAR data to consider not only biological but also geographical factors.
- It enables mapping risks in different cities according to their own characteristics.
- Healthy itineraries for allergic patients are proposed by using risk mapping.
- AIROT is an efficient tool in urban planning and a way to assess plane tree's risk.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 February 2019

Received in revised form 19 July 2019

Accepted 22 July 2019

Available online 25 July 2019

Editor: Elena Paoletti

Keywords:

Aerobiological index
 Healthy urban itineraries
 Kriging
 Plane trees and allergies
 LiDAR
 Urban planning

ABSTRACT

Ornamental trees bring benefits for human health, including reducing urban pollution. However, some species, such as plane trees (*Platanus* sp.), produce allergenic pollen. Consequently, urban maps are a valuable tool for allergic patients and allergists, but they often fail to include variables that contribute to the “building downwash effect”, such as the width and shape of streets and the height of buildings. Other factors that directly influence pollen dispersion (slopes and other geographical features) also have not traditionally been discussed. The LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) technique enables one to consider these variables with high accuracy. This work proposes an Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees (AIROT) and the establishment of potential areas of risk of exposure to *Platanus* pollen.

LiDAR data from five urban areas were used to create the DEM and DSM (Digital Elevation and Surface Models) needed to perform further analysis. GIS software was used to map the points for each city and to create risk maps by Kriging, with stable (3 cases) and exponential function (2 cases) as the optimal models. In short, the AIROT index was a useful tool to map possible biological risks in cities. Since AIROT allows each city to consider its own characteristics, including geographical specifications, by using remote sensing and geostatistics techniques, the establishment of risk maps and healthy itineraries is valuable for allergic patients, allergists, architects and urban planners. This new

*Corresponding author.

E-mail addresses: raulpc@unex.es (R. Pecero-Casimiro), santiferro@unex.es (S. Fernández-Rodríguez), ratormo@unex.es (R. Tormo-Molina), bioamc@outlook.com (A. Monroy-Colín), insilva@unex.es (I. Silva-Palacios), jpcortes@unex.es (J.P. Cortés-Pérez), magonzalog@gmail.com (Á. Gonzalo-Garijo), jose.manzano@dit.ie (J.M. Maya-Manzano).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.382>

0048-9697/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

aerobiological index provides a new decision-making tool related to urban planning and allergenicity assessment.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Currently, world overpopulation has become a significant problem that exacerbates pollution and urban air quality deterioration problems. In 2010, 73% of European citizens lived in urban areas, and this number is predicted to increase to >80% by 2050, with associated problems of traffic, air pollution, safety and noise (Comission-Mobility, 2017). Aero-biological information is being considered as an element of design in green infrastructure planning, potentially avoiding the entrance of pollen into these areas (Fernández-Rodríguez et al., 2018). Thus, the evaluation of local factors and mapping the sources (Rohde and Muller, 2015) can be used to enhance air quality. Urban maps are increasingly being produced with multiple applications, including land-cover features, residential heat and health impacts (Jenerette et al., 2016), monitoring the invasion of natural landscapes by urban trees (Gavier-Pizarro et al., 2012) and urban flowering maps (Massetti et al., 2015).

There is recent scientific interest in urban green aspects and their potential to contribute positively to human health (Ekkel and de Vries, 2017), including landscape ecological urbanism (Steiner, 2011). Urban forests contribute immensely to the sustainability of cities and public health (Coutts, 2016), with trees considered by some as indispensable (Duinker et al., 2015). Certainly, their presence can succeed in mitigating the urban heat island effect (Maimaitiyiming et al., 2014). We need to begin to consider the need to produce future urban planning scenarios, based not only on aesthetic criteria regarding the urban landscape but also to benefit the evaluation of suitable trees in view of their potential for allergenicity (Cariñanos et al., 2017).

Platanus sp. is included amongst the most allergenic ornamental trees used in urban planning (Fernández-González et al., 2013a) but is widely used in Mediterranean urban environments (Maya-Manzano et al., 2017a) due to its low price, rapid growth, wide shadow and tolerance to water shortages. Furthermore, its popularity could be related to irrigation management and extension in peri-urban landscapes (Maheshwari and Plunkett, 2015). Blanus et al. (2015) indicated that *Platanus* planting could be considered in Mediterranean urban environments due to its efficiency in accumulating and retaining airborne particles. We consider it appropriate to begin this work with plane trees due to both their importance and allergenicity. Moreover, the mapping for these trees was done in previous studies for the same region as the current work (Maya-Manzano et al., 2017a; Maya-Manzano et al., 2017c), and the capability of dispersion is limited (Bricchi et al., 2000), which implies that this tree could be appropriate.

Aerobiological source mapping in a territory is an interesting topic due to the importance of vegetation for airborne content (Maya-Manzano et al., 2017b; Rojo et al., 2015; Smith et al., 2008) and consequently for human health. Lately, the knowledge gaps about the influence of ornamental plants in the pollen spectrum inside cities are being filled (Cariñanos et al., 2014; Maya-Manzano et al., 2017a; Maya-Manzano et al., 2017c; Staffolani et al., 2011; Velasco-Jiménez et al., 2014). However, it is not as common that those that have studied this topic have added maps to determine the influence of source locations within a city and in urban green infrastructures (Fernández-Rodríguez et al., 2014a; Maya-Manzano et al., 2017a). In fact, the use of these maps in practical decision tools has been often overlooked. Therefore, their influence on the population, especially allergic patients, allergists and policy makers, needs further study.

In urban assessment and planning criteria, the use of remote sensing (Senes et al., 2016) and, in particular, LiDAR (Light Detection and Ranging or Laser Imaging Detection and Ranging) is becoming increasingly widespread. In recent years, LiDAR has been used to analyse bioaerosols

in rural environments (Luo et al., 2017) and in urban ecosystems (Chen et al., 2017) to estimate biomass. Other uses related to urban planning include the assessment of urban tree condition (Plowright et al., 2016), their mapping (Alonzo et al., 2014; Dian et al., 2016), prediction of tree species richness (Gillespie et al., 2016), studies in conifer phenology (Lin and West, 2016), quantification of the 3D structure of vegetation (including height) (Caynes et al., 2016; Imai et al., 2004), and urban tree canopy cover (Lovasi et al., 2013; Parmehr et al., 2016). Furthermore, M. Sicard et al. (2016); P. Sicard et al. (2016) studied pollen grains by near-surface and columnar measurements and with diurnal patterns of their vertical distribution (Noh et al., 2013).

We suggest that LiDAR could be useful for mapping possible biological risks in cities, considering some factors that are critical for understanding the dispersion process for pollen grains in cities, such as geographical slopes and features and the influence of buildings and other barriers within cities, which contribute to the building down-wash effect (Thompson, 1993). The width of the streets and heights of the buildings can potentially lead to high concentrations of particles in some places (Cariñanos et al., 2002), and they can be considered an effective barrier in other cases. Some authors have included topography and geography in the mapping of pollen sources and pollen dispersion (Puppi Branzi and Zanotti, 1992), but the inclusion of this topic together with urban barriers remains a gap in the literature.

Another important geostatistical tool frequently used for creating risk maps is Kriging, a well-known interpolation method that has been widely used in diverse scientific disciplines, including the environmental sciences. Amongst them, we can cite its inclusion in phenological studies (León-Ruiz et al., 2011; León Ruiz et al., 2012) or, in a way similar to our proposed work, as a function composed of some independent environmental variables such as altitude, slope, urbanisation, and geographical features (Puppi and Zanotti, 1989). Kriging has also been used in other disciplines such as crop productivity (Machida et al., 2012) and maps of vegetation inventories and biomass calculations (Tsui et al., 2013). It is especially important in countries with vast surfaces occupied by tropical rainforests (Fayad et al., 2015). In regards to air pollution, Kriging was used to create urban risk maps of environmental pollution (Berens et al., 2017; Matějček et al., 2006; Rohde and Muller, 2015; P. Sicard et al., 2016). Finally, regarding aerobiological studies, Kriging has been used for estimating pollen concentrations in middle points lacking available samples (Alba et al., 2006; Della Valle et al., 2012; Oteros et al., 2019) and for establishing comparisons between the flowering of plants and airborne pollen concentrations (Rojo and Pérez-Badia, 2015).

Recent publications describe the creation and use of indexes in aerobiology, such as the work of Fernández-González et al. (2013b), Mrdan et al. (2017) and Ríos et al. (2016). In urban planning, aerobiological indexes have been created based on the allergenicity in urban parks (Cariñanos and Casares-Porcel, 2011; Cariñanos et al., 2017). For this, the composition of the flora and some biological and developmental characteristics of trees present in several Spanish parks were studied. Using some parameters (some of them not usually seen in the aerobiological literature) for creating a new aerobiological index for all urban scenarios, together with a combination of LiDAR and Kriging, would enable the creation of risk maps for dispersion. We assume that some of these geographical features influence biological factors, decreasing the pollen concentration with the height (Gehrig and Peeters, 2000) and bringing forward the pollen release when specimens are more exposed to sun radiation than those in the shade (Kjelgren and Clark, 1992), because the heat requirement for pollen release would be achieved earlier. These factors could lead to a higher exposure in populations within these areas. In

the same way, if pollen has difficulty dispersing to some places because of obstacles, there would be the same difficulty in dispersion from these same areas. It could be used as a novel and powerful tool for mapping urban healthy itineraries for the population (Maya-Manzano et al., 2017a), giving information about the most harmful places for allergic patients and being a useful tool for allergists. Our study considered several urban elements that have ornamental plane trees planted in an integral way to establish different zones of urban risk to said pollen type. Ornamental tree species have been used to assess the particulate matter exposure in urban environments (Barima et al., 2014), and *Platanus* spp. is one of the main urban ornamental trees with allergenic potential in the Mediterranean region (Fernández-González et al., 2013a), with high potential for allergenicity (Cariñanos et al., 2017).

This work aims to establish one additional step to the method described in a previous publication (Maya-Manzano et al., 2017a) and to use the available information regarding the geolocation of plane trees in five cities of Extremadura (SW Iberian Peninsula), combined with available and free-to-use LiDAR data (IGN, 2019) to accomplish the primary goals.

- 1) To propose an Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees (hereafter, AIROT), that takes into account different parameters that influence this risk. For this analysis, we use well-known aerobiological parameters (abundance of pollen sources and maturity degree of specimens), together with aspects that seem to play unclear roles in aerobiology, such as geographical features, slopes, height above the sea level and intrinsic differences in the urban characteristics for each city, including the presence of buildings and differences in urban planning.
- 2) Based on LiDAR data, and considering the AIROT index and the geolocation of the ornamental trees, to create risk maps for plane trees by using Kriging in each city. Points with high and low risks of exposure will be established, which will be valuable for

creating urban healthy itineraries (taking as an example the city of Badajoz) or identifying comfortable points.

2. Materials and methods

2.1. Sampling site

Extremadura (Fig. 1) is a large region (41,635 km²) located in the SW Iberian Peninsula (Europe) that is sparsely populated (1,072,863 inhabitants according to NSI, 2017, a density of 26 inhabitants/km²). Its surface is mostly dedicated to agriculture and extensive farming, with natural landscapes dominated by holm and cork oaks (*Quercus rotundifolia* and *Q. suber*) and pastures in the south, and Pyrenean oaks (*Q. pyrenaica*) and chestnuts (*Castanea sativa*) in the north. Other species, such as pines (*Pinus pinea* and *P. pinaster*) and eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus*) were widely planted for silviculture and have naturalized. Regarding its orography, this region is crossed by two main rivers (Guadiana and Tago) separated by a central medium-high mountain range that runs along the two provinces, Badajoz and Cáceres, with 290 km from the northern border to the southern. Its climate is characterized by mild winters and hot summers, with a continental Mediterranean climate and an annual mean temperature of 16.7 °C with an annual rainfall of 499 mm (AEMET, 2018).

The cities in Badajoz province in this study were Badajoz (BA) (38° 53' N, 6° 58' W, 184 m.a.s.l.), Don Benito (DB) (38° 58' N, 5° 50' W, 253 m.a.s.l.), both with flat orography in their surroundings, and Zafra (ZA) (38° 25' N, 6° 25' W, 508 m.a.s.l.), with the mountain range of La Alconera in the west of the city. In the Cáceres province, we studied Cáceres (CC) (39° 48' N, 6° 20' W, 459 m.a.s.l.) and Plasencia (PL) (43° 10' N, 2° 25' W, 253 m.a.s.l.), the first one with the mountain range of Fuentes dividing the city in two, and the second one located in the valley floor of the Jerte river. The importance, location and number of individual plane trees in these five

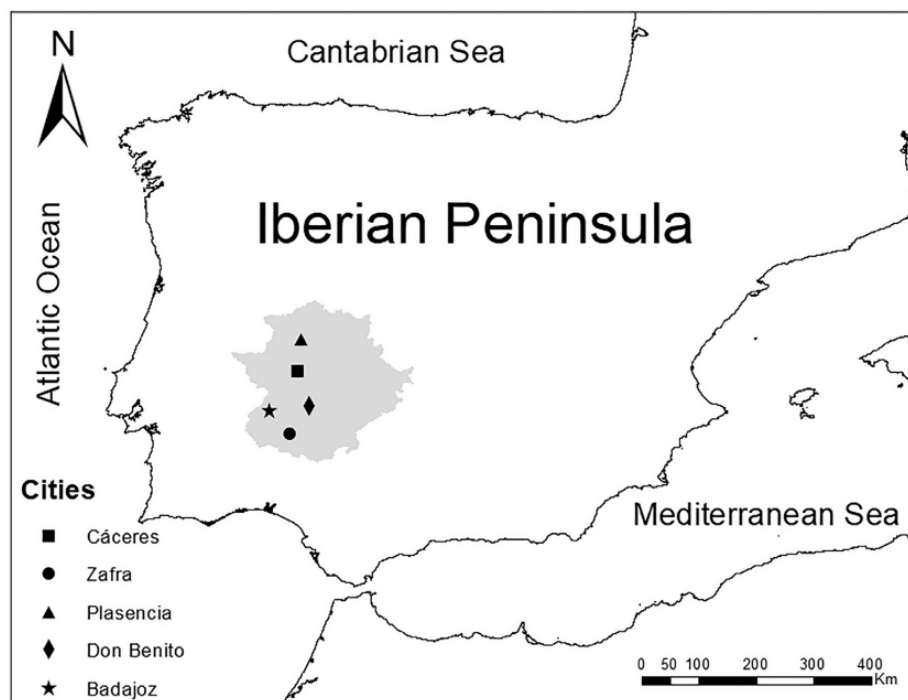


Fig. 1. Map of Extremadura in the Iberian Peninsula and the location of the studied cities.

cities were previously studied (Maya-Manzano et al., 2017a), with the annual average concentrations for three of these cities of 15.1 (DB), 1.7 (PL) and 1.2 (ZA) pollen grains m^{-3} and being the second (after *Olea europaea*), the first and the second (after *Ulmus minor*) ornamental trees in importance for the same three cities (Maya-Manzano et al., 2017c). Their surface ranged from 15.4 and 13.6 km^2 for BA and CC to 4.8, 4.3 and 3.5 km^2 for PL, DB and ZA. For BA and CC, the predominant urbanisation type is mainly medium-high buildings for the new residential areas, with wide boulevards or avenues and some large parks and squares, together with narrow streets for the historical streets in the city centre. In the rest of the cities, which are smaller than these two, the most abundant urbanisation type is narrow streets with residential units of one or two floors for each household. Some parks with abundant plane trees are located in more open spaces. The most important areas for *Platanus* pollen risk according to the calculated index can be consulted in the supplementary material section (Table S1).

2.2. LiDAR data

Groups of 2×2 km LiDAR images for each urban area (dated in 2010, the only database available to date for this region) were used to create the DEM (Digital Elevation Model) and DMS (Digital Surface Model) needed to perform the visibility analysis in the following steps (used in AIROT as Potential Dispersability). They have a LiDAR density point cloud of 0.5 points/ m^3 and were obtained from the website of the Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2019) in LAS files. These files present some anomalous points (misclassifications, incoherent points according to their heights, etc.) that need to be removed from all locations to avoid mistakes in the following steps. The software package Global Mapper 16.2 (Blue Marble Geographics, 2016) was used, and DEM and DSM in raster were created with the same computer programme. LiDAR technology is very helpful in the construction of these digital models, for considering all of the buildings, trees and other possible obstacles or barriers in the creation of DSM with high accuracy and excellent resolution, and above all the shape characterization of each building (Gamba and Houshmand, 2000). Fig. 2 shows some LiDAR point clouds for different sites, paying attention to buildings and vegetation.

2.3. Creation of the index of risk for ornamental trees. A case study: plane trees

Since the Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees (AIROT) was proposed using the same parameters and numerical range for a city, it allows for the establishment of comparisons of the risk of pollen exposure from ornamental trees (plane trees) amongst cities and even areas within the same city (Fernández-Rodríguez et al., 2013; Maya-Manzano et al., 2017a). In each street, average values for each parameter were taken into account, and when differences between parameters were found, we considered as many points as necessary, with the goal of being as representative as possible responding to the observed changes. These different sampling points in the vegetation characteristics within each street were particularly necessary in some main avenues and parks, due to their large size. A detailed work scheme is shown in Fig. 3.

The index is proposed considering the physical (places where trees are located, shape of street, elevation and slopes obtained from the LiDAR database, because they determine the potential of dispersion for pollen grains) and biological (maturity degree and number of specimens) features of each ornamental tree and the characteristics of the urban street design. Combinations of these parameters are proposed by eq. (1), the Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees (AIROT):

$$AIROT = \sum_{i=1}^n \frac{PD_i \cdot N_i \cdot M_i \cdot SH_i \cdot H_i}{ST} \quad (1)$$

where

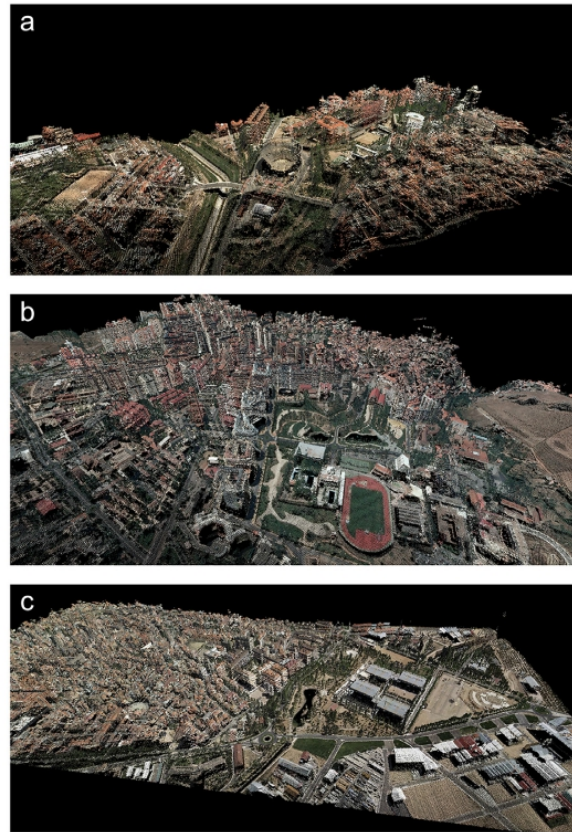


Fig. 2. a. LiDAR point cloud for the city of Badajoz. b. LiDAR point cloud for the city of Cáceres. c. LiDAR point cloud for the city of Don Benito.

PD_i = Potential Dispersability (0, 10);

N_i = Number of specimens by distance (trees/ha) (from 0 to 10);

M_i = Maturity degree for each specimen (1, 5, 10);

SH_i = Incidence and presence of high buildings, narrow streets and squares (1, 2, 4, 6, 8, 10);

H_i = Height above sea level (1, 5);

ST = total surface of the city in km^2 ;

i = streets.

The calculated index was normalized, taking values between 0 (minimum risk, in green colour) and 1 (maximum risk, in red colour) and mapping each street of each city according to these scores.

The index was created while taking into account the following parameters:

2.3.1. Potential Dispersability (PD)

Potential Dispersability modelling establishes the extent to which a nominated feature may be seen from a specified location (Bartie et al., 2011). This parameter was calculated by means of the visibility analysis, which was carried out using commercial GIS software and taking into account all of the buildings and heights presented surrounding the selected points (the plane trees). By using a LiDAR point cloud to create DSM to perform this analysis, high accuracy can be achieved in this digital model, and we can consider all of the possible potential barriers in dispersion. In particular, by means of the tool called "View Shed", with a transmitter elevation of 5 m height, we

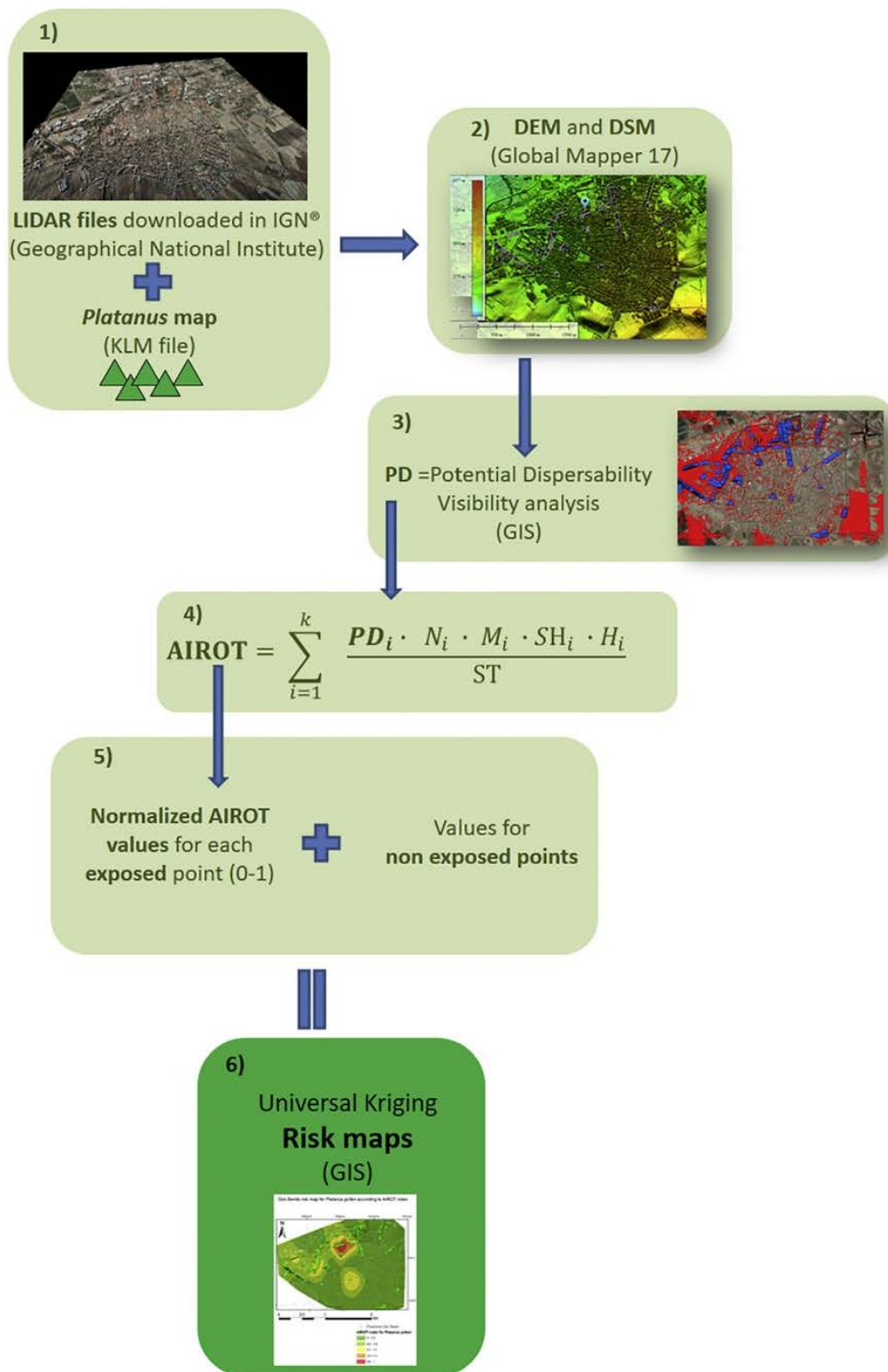


Fig. 3. AIROT work scheme.

considered the trees with a minimum of this size as risky for human health and capable of releasing pollen, increasing their capability of dispersion according to their maturity. According to Skjøth et al., (2013), in the case of birch, pollen will be significantly released in specimens with a height ranging from 5 to 20 m above the ground. This value has been used to establish control visibility values (Murgoitio et al., 2013). With this size, the trees would not only be located a few metres above the ground and would be able to avoid the lower buildings, but it also takes into account that trees have a minimum maturity degree. The receiver elevation would be any point with 1.5 m height because it would be an ordinary height for human exposure. This score was given in absolute values, dividing the areas as exposed (10) or not exposed (0). Middle scores were not considered.

2.3.2. Number of specimens by distance in each street (*N*)

The presence of sources of vegetation is an important factor that influences the pollen load in one area (Maya-Manzano, 2017b; Rojo and Pérez-Badia, 2015). To be able to compare different cities in future studies, we calculated the density of individuals for each street (trees/ha), and their values were normalized from 0 to 10, considering the number of individuals studied in Maya-Manzano et al. (2017a).

2.3.3. Maturity degree for each specimen (*M*)

A maturity degree score (trunk diameter and branch development) was given for each street. This parameter has been studied and considered as essential in the potential to release pollen, making it possible to have higher pollen concentrations (Maya-Manzano et al., 2017a). Due to possible differences between the maturity degree amongst the plane trees located in a single street, they were scored as an average, considering a higher value when necessary. This is because in cases when some plane trees are still immature, a conservative score could mask the real risk in the near future. For this reason, according to the three life stages of the tree (Germino et al., 2002; Thomas and Winner, 2002) and the stages of development, we propose these values for plane trees: young (1), from the time when they are planted until the first year in which they can produce flowers, adult (5) and mature (10), for trees > 10 years old.

2.3.4. Incidence and presence of high buildings, narrow streets and squares (*SH*)

Considering the presence of narrow streets and high buildings as a theoretical barrier that handicaps pollen dispersion (Cariñanos et al., 2002), lower scores were given in these streets for this parameter. Based on the classifications of previous papers (Barnett, 2008; Golan, 2015; Hoekstra, 2012; Sreelekha et al., 2017), we proposed these values: local residential/office/commercial/industrial street (1), parkway (2), boulevard (4), main street (6), and wide avenue (8). Regarding parks or public squares (10), a priori they are more suitable to allow tree pollen dispersion because they have large areas of open space and fewer obstacles, allowing a better air flux renewal. This kind of urban microenvironment also allows the correct development of the tree crown, as was reported for *Robinia pseudoacacia* L. and *Tilia cordata* Mill. (Bayer et al., 2018).

According to a previous study (Kjølgren and Clark, 1992) of *Liquidambar styraciflua* L., the individuals in parks and squares received unobstructed sunlight, with thinner leaves and less trunk growth in canyon streets compared with parks.

To distinguish between avenues and wide streets, we proposed to take into account the number of traffic lanes as an easy indicator, with 4 or more considered as avenues. We also consider avenues with parks and those of greater width (more so than wide avenues, 4 traffic lanes plus parking and sidewalks) as parks, in order to consider that dispersion is easier.

2.3.5. Height above sea level (*H*)

According to Scheifinger et al. (2002), at a local or regional scale, changes in phenological time series can be induced by

micro-meteorological conditions in mountainous areas (20–40 days every 1000 m of elevation). It is provoked by disturbances in the North Atlantic Oscillation (NAO), which maintains temperature inversions for long periods of time in valleys, causing an increase in time for the different phenophases. The authors grouped the sampled locations into those of height > 1500 m or height < 1500 m above sea level. This is consistent with the findings of Sharma et al. (2012), who estimated an average production of pollen cone per tree of $42.44 \pm 8.32 \times 10^3$ at lower altitudes and $28.1 \pm 0.89 \times 10^3$ at higher altitudes. We propose to use the same two categories previously mentioned in Scheifinger et al. (2002), using values of 1 for higher altitudes (sampling points within the city > 1500 m.a.s.l.) and 5 for lower altitudes (places within the city < 1500 m.a.s.l.). This parameter can be useful to distinguish the behaviour of phenology in places with points in the two categories, or making it possible to compare amongst different places, including different countries and different bioclimatic regions.

However, since the 5 cities studied in this work belong to the second category (all the places in these cities were below 1500 m.a.s.l.), this parameter was not relevant in our calculations.

2.4. Kriging and risk maps

The Kriging technique is performed by means of complex mathematics, algorithms and equations. This technique gives estimations based on semivariogram calculations about continuous variables at points where there were no monitoring stations or sampling points. Each function is tested until the best fitness to the points is found, according to the values for Root Mean Square Error (RMSE) and the Spearman's rank correlation. The Kriging was carried out using commercial GIS software and the two mentioned parameters by using R statistical software (R-Team, 2013). Five different functions (Stable, Circular, Spherical, Exponential and Gaussian) were compared (Table 2). The semivariograms for the optimal models (Fig. S1), the cross validation for each model and city (Fig. S2), together with the uncertainty maps (Fig. S3), can be found in Supplementary materials. After that, the different points and the coordinate *z* (AIROT index) were studied by ordinary Kriging, which was used considering the 25 closest values to locate the continuous scores in intermediate areas inside the surfaces studied. According to the AIROT index, raster maps with scores for different streets with plane trees present or not were created for each city. To study the cities, a balance between representativeness for all places and computational resources was taken into account, and samples were taken from 162 (PL) to 680 points (CC) to be as representative of all changes produced in the parameters as possible.

2.5. Healthy itineraries

Healthy itineraries for the city of Badajoz, as an example, were created using GIS, taking into account the official transport network for this city; in other words, the network of roads for vehicles and pedestrian areas, downloaded from the website of the Instituto Geográfico Nacional® (IGN, 2019). Two different routes were advised (one from south to north and another from east to west). To plan the best path to be taken by pedestrians, we considered the following points:

- The pedestrians should take a path included in the existing transport network.
- The suggested path should be in areas with the minimum AIROT risks for as long a distance as possible.
- The itinerary should avoid, if possible, the points with high PD or directly exposed points (according to the visibility analysis).
- At moments when it was not possible to accomplish the two previous parameters, the itinerary should minimize the risks, including crossing where the AIROT values are as low as possible or using the most direct route in order to make the path as safe as possible.

3. Results

3.1. Values for AIROT

Table 1 shows the average for each parameter considered in AIROT according to the number of sampling points (not the absolute number of trees, but the density). Badajoz and Cáceres had the highest values (0.34 and 0.25), while Plasencia was estimated as the lowest (0.16). We can see how the highest number of individuals is located in Badajoz and Cáceres; those are also the biggest cities amongst those studied. We can also say that Cáceres and Badajoz generally contained the most mature specimens, present mostly on wide avenues or in parks, where they had grown for several years. Thus, Badajoz recorded the maximum value of the number of specimens (3.23), while Cáceres was remarkable for the maturity of the plane trees (9.96) and the shape of the streets (8.69). The cities of Badajoz and Cáceres are the most exposed because they contain many wide avenues, mostly landscaped areas. All of these things combined gave Badajoz higher values for AIROT. Don Benito showed a maturity of 6.40 and street shape of 5.51, obtaining an AIROT of 0.24. Zafra did not show any parameters in particular with higher values, but all of them can be considered as medium-high, maturity (6.61) and streets (5.81), which brought the AIROT index higher than Plasencia. Finally, Plasencia had its sampling points in areas with many trees, but they were still immature (3.40). This outcome, added to its lower exposure (narrow streets, residential areas without or with few plane trees, etc.), was reflected in a lower AIROT.

3.2. Risk maps using LIDAR and Kriging analysis

The results for the Kriging analysis are shown in Table 2. The Exponential and the Stable functions were the optimal models in all the cities. Stable models frequently produce suitable results because this kind of function takes an additional shape parameter that allows changing curvature in the models while they maintain the nugget, the range and the sill. In Don Benito and Zafra, the Exponential model was the most robust according to Spearman's correlation test and the RMSE. For Cáceres and Badajoz, the Stable model was the winner, and finally, for Plasencia, the Stable and the Gaussian models were similar, although being slightly better the Stable. The highest values for the index (Supplementary material) came from large avenues, squares and parks, where the absence of solid obstacles facilitates dispersion; these areas also generally have a certain number of mature individuals, as in Badajoz and Cáceres (Fig. 4A and B). Badajoz contained three different hotspots, located in the NW, SW and SE. Curiously, according to the followed methodology, the points with more risk to facilitate exposition through the city were large avenues, and some parks (e.g., San Francisco) did not reach the maximum AIROT. Cáceres seems to be divided into two main areas, one in the SW and the other in the SE, with lower values in the middle, which can be explained by the presence of a mountainous geography that crosses the city. The same happened in Don Benito (Fig. 4C). Here, the maximum values were obtained in the north of the city, in areas with more open spaces. In contrast, in the centre and the south of the city, the exposure risk seems to be lower, corresponding with areas with

fewer individuals, with most of them being immature and located in narrow streets due to the age of the neighbourhoods.

Having a large number of plane trees is another factor for increasing the value of AIROT, but not always, as seen in the Plasencia map (Fig. 4D). In this map, despite having some areas with a great number of specimens, most areas belong to the first category in maturity degree, which can be translated into low scores in this parameter. Therefore, some parts of each city have great importance. This could be due to the presence of high density hotspots for large squares and some big parks. This can be observed in the centre-South of Plasencia. Finally, in Zafra (Fig. 4E), due to the concentration of almost all trees in two isolated main spots in the NW and in the city centre, we have a homogeneous distribution of AIROT values, with a characteristic concentric ring shape for these two points.

3.3. Healthy itinerary

Fig. 4A shows how an allergic patient can take different paths to avoid the risk of exposure to *Platanus* pollen within the city of Badajoz. Despite being crossed by plane trees in the south of the city, the safer itinerary includes crossing some main avenues at certain points according to the requirements explained in Section 2.5.

4. Discussion

New tools related to 3D simulations, mapping and urban planning in cities are becoming more common, and they are helpful to integrate aerobiology in urban studies. Previous studies of local dispersion of airborne particles such as *Pinaceae* concentration assessed the meteorological conditions with innovative engineering techniques such as BIM (Building Information Modelling) (Fernández-Rodríguez et al., 2018). The wind direction pattern was considered because the studied area was limited to one delimited and specific area in the city of Badajoz (approximately 150 m), and close enough to one meteorological station and the sampling point. However, to consider the meteorology for different points in cities is a complex task, taking into account current limitations, such as the locations of the weather stations, which are usually located outside the cities, as in our case. This leads to a lack in the representativeness of the weather parameters when we want to extrapolate values within the entire city. Thus, the influence of the wind direction patterns has been studied based on the pollen content provided for each wind direction, as it has already been considered in previous studies of the same five cities (Maya-Manzano et al., 2017a) and their surroundings (Fernández-Rodríguez et al., 2014b; Maya-Manzano et al., 2017c). Those studies reported the implications of the predominant wind direction patterns if those were aligned with the main sources of pollen, and how sources located in different directions and their aerobiological contents can be underestimated. The influence of the wind direction considering the location of the sources has also been discussed by Silva-Palacios et al. (2000). Due to the previously described factors, the meteorological influence is beyond the scope of this study. When we introduced the total surface for each city into the equation, we considered the limited dispersion of plane tree pollen (Bricchi et al., 2000), taking into account that the differences in risks and pollen dispersion should be more notable in big cities. The maximum values are achieved when one sample point is composed mostly of a great number of mature individuals, in a park or large avenue with a large area, and is directly exposed to plane trees.

Parks or public squares could show more suitable conditions for the potential dispersion of airborne particles because they allow for a better air flux renewal and the correct development of the tree crown; for example, in a study of *Robinia pseudoacacia* L. and *Tilia cordata* Mill. (Bayer et al., 2018). If it is true that they are not the same species, in Maya-Manzano et al. (2017c), the importance of trunk maturity and branch development for *Platanus* is highlighted. A further study to compare the trunk and branch development and

Table 1

Average values for the main parameters used in AIROT (please note that it is not the absolute number of specimens, but the density of individuals normalized from 0 to 10).

City	Number of specimens (N)	Maturity of specimens (M)	Shape of streets (SH)	AIROT
Badajoz	3.23	9.87	8.45	0.34
Caceres	3.08	9.96	8.69	0.25
Don Benito	1.86	6.40	5.51	0.23
Plasencia	3.06	3.40	3.13	0.16
Zafra	2.17	6.61	5.83	0.19

Table 2

Results for the different functions that were tested in the Kriging analysis according to the RMSE and the Spearman's rank correlation. Better results coloured in bold.

City/function	Stable	Circular	Spherical	Exponential	Gaussian
Badajoz	RMSE = 0.127 r = 0.852	RMSE = 0.136 r = 0.842	RMSE = 0.134 r = 0.845	RMSE = 0.126 r = 0.851	RMSE = 0.148 r = 0.826
Cáceres	RMSE = 0.087 r = 0.850	RMSE = 0.091 r = 0.828	RMSE = 0.091 r = 0.828	RMSE = 0.087 r = 0.847	RMSE = 0.091 r = 0.826
Don Benito	RMSE = 0.176 r = 0.765	RMSE = 0.167 r = 0.775	RMSE = 0.164 r = 0.779	RMSE = 0.151 r = 0.794	RMSE = 0.209 r = 0.693
Plasencia	RMSE = 0.108 r = 0.697	RMSE = 0.118 r = 0.662	RMSE = 0.117 r = 0.668	RMSE = 0.121 r = 0.662	RMSE = 0.108 r = 0.697
Zafra	RMSE = 0.097 r = 0.782	RMSE = 0.099 r = 0.778	RMSE = 0.097 r = 0.782	RMSE = 0.103 r = 0.786	RMSE = 0.097 r = 0.782

consequently pollen production is needed, specifically for those plane trees located in parks and the specimens located in narrow streets.

In this sense, we included the Potential of Dispersability (PD), which is considered as a theoretical indicator of potential pollen dispersion and transport from one place to another. It highlights which areas in each city would have direct exposure to the pollen coming from ornamental trees or from other places and which areas would not (isolated points would not be as risky as open spaces for allergic patients as described in Section 2.3.4.). Minimum values will be recorded in narrow streets, with no plane trees present and no direct exposure to any of them. However, there is no consideration of a null category because the authors consider that a null value can be only theoretical, and the presence of pollen can be provoked by re-floating or from other streets near to those studied. The values given in the current work are a first approach. All the parameters must continue to be under study, and the values should be continuously readjusted in future studies. We consider that the source locations (as they are ornamental trees, their presence is restricted to urban locations) and the Potential Dispersability (PD) make it easier to estimate the possible presence of airborne pollen content at specific points for each location, according to the predominant wind directions for each city. Therefore, in BA (Fig. 4A), when the wind blows from the NE, the risk is lower than when blowing from the SW or SE. For CC (Fig. 4B), winds from the SW are potentially dispersing more *Platanus* pollen than winds from the NW. Finally, in DB, PL and ZA (Fig. 4C, D and E), winds blowing from the N could bring higher pollen concentrations if the rest of the parameters included in AIROT (presence of trees, maturity of specimens, wide streets allowing good wind flow and Potential Dispersability) were appropriate. All these considerations are very useful for cities with planted green infrastructure or to project new green infrastructure urbanism projects.

The visibility analysis, even though it has some limitations (that are shared with atmospheric modelling in a small space within a city), could be a good enough approach to the problem of the concentric effect provoked by turbulence in pollen dispersion, provoked by street canyons. The pollen that will be dispersed by these turbulent movements can be removed from monitoring due to the random effect.

At the least, we can ensure that some points can be more exposed than others based on this tool, which can be interpreted easily. As emission sources, 5 m was considered as a minimum, because this size was proposed for other trees in the literature (for *Betula*, Skjøth et al., 2013), and the receptor at 1.5 m height. Regarding the Kriging analysis, some authors reported optimal results with the same models as the current study (Dindaroglu, 2014), although other authors found the Gaussian to be more suitable (Oteros et al., 2019).

AIROT is proposed to complement the Index of Urban Green Areas (IUGZA) (Carriñanos et al., 2014), which does not consider meteorological parameters. The index presented here focuses on the geography and the shape of the streets. In addition, unlike IUGZA, it takes into account all areas outside and inside parks. Our study proposed to indicate which areas of each city are the safest from the aerobiological point of view, and which areas have more risk, considering the particularities and characteristics of each city, as was explained in Sections 3.1 and 3.2. Consequently, it is possible to compare AIROT based on an element of urban green

infrastructure, namely plane trees, between several cities using a normalized value (0–1). Therefore, it is proposed that AIROT is a scalable index (Carriñanos et al., 2014) that could be implemented in more cities (Carriñanos et al., 2017). Mueller et al. (2018) normalized five scales of values of urban parameters for a city, including road network, PM_{2.5}, noise levels and green space, in order to create a health impact assessment to establish multiple environmental burdens.

A factor to consider is to limit the values for each ornamental tree being studied by using this index. Thus, as an example, for this first approach, we focused on the growth rate of plane trees and their maturity degree; these may be different for each species and even for localities (Vaz Monteiro et al., 2017), which should be noted. Moreover, there are authors that have found a positive relationship between pollen production by trees and the diameter of the tree crown (Tormo-Molina et al., 1996) or trunk diameter (Maya-Manzano et al., 2017c). Since this factor is associated with each specific tree, to give a representative score for each species regarding the maturity of the individuals can be important to properly apply the index. Due to the difficulties in determining the exact age of each tree, we took into account the age according to observations at different periods by using tools such as Street View in Google Maps, following the same methodology as in previous studies (Maya-Manzano et al., 2017a). Regarding the number of specimens, since the number of specimens and the area occupied by each street are easy to obtain, by using the density of trees (trees/ha), this index can be easily extrapolated and used in other cities, allowing the comparison in multi place studies. The same aim is managed by adding the altitude, making the application of this index at places in different regions easier (for example, in comparisons including risks in cities worldwide).

Modelling carried out using LiDAR offers the opportunity to consider the geographical features involved in the dispersion of the pollen grains. On the basis of previous urban planning studies (Maya-Manzano et al., 2017a; Maya-Manzano et al., 2017c), we feel it is necessary to improve urban mapping in order to use it as a prevention tool in order to design urban healthy itineraries (Fig. 4A). These healthy itineraries show the best path to be taken by allergic patients through a city, to move amongst these paths from distant points by minimizing risks. In this sense, AIROT and the risk maps are proposed as a useful tool. Actually, the capital cities are proposing to reduce contaminants (CO₂, mainly) in their development plans (Johnson et al., 2017; Tang et al., 2018). This idea is scalable to develop urban models of exposure to urban organic pollutants such as pollen types with allergenic potential. To assess the health impact, the risk and exposure have been analysed as a part of urban and transport planning (Mueller et al., 2018), including the particulate matter distribution of herbaceous and tree leaves (Barima et al., 2014). We consider this idea appropriate to implement with ornamental sources of pollen and the allergenic effect of pollen. These maps are useful to identify areas at risk, as source mapping can be used to enhance air quality (Rohde and Muller, 2015) and to express the phenological response from the impervious surface gradient and seasonal thermal variations (Massetti et al., 2015). Furthermore, dispersion and

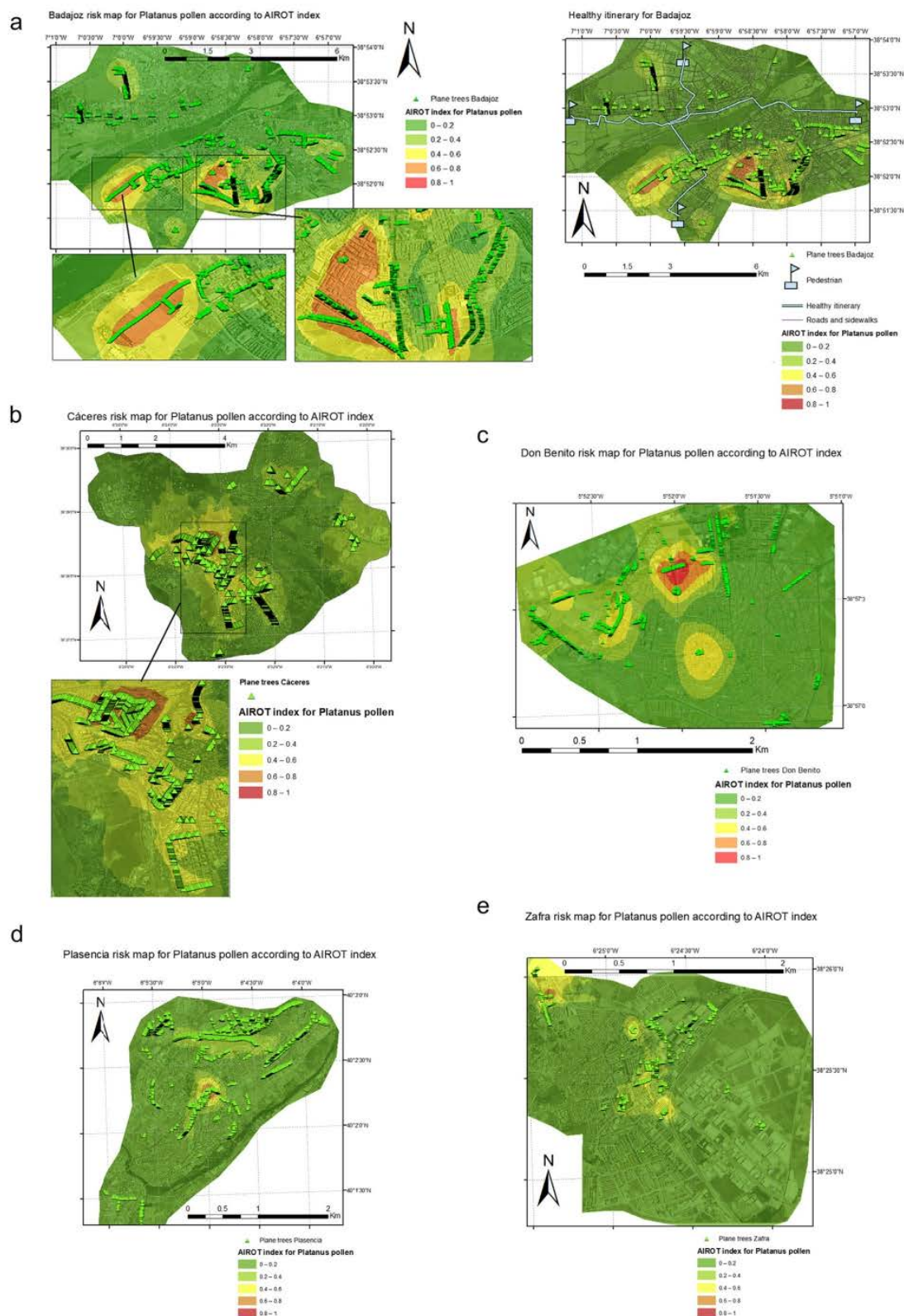


Fig. 4. Risk maps for each city according to the AIROT index (4A Badajoz and Health itinerary example, 4B Cáceres, 4C Don Benito, 4D Plasencia, 4E Zafra).

exposure have been considered in urban planning with other aims, such as roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts (Tong et al., 2016) and aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons (Buccolieri et al., 2009; Gromke et al., 2008).

In future work, to enhance the performance of the index, it would be necessary to periodically revise risk maps due to the possible replacement of some trees by others and due to the changes provoked by the mortality of some individuals. On the other hand, note that the immature specimens of today will grow and will release more pollen in the near future. In addition, it would be advisable to introduce pruning, and for this, it would be necessary that city councils and urban planning managers were more engaged in all of the procedures. Urban construction guides (Alvarado et al., 2014; MOPT, 1992) could be improved if ornamental tree pruning was considered to manage the air quality. In our case, unsuccessful attempts have been made to work on pruning plane trees, but sometimes the lack of information about local pruning management companies, the different way of working of each professional in each city and a lack of time have not made it possible (Guilherme et al., 2018; Ponchia et al., 2010). This topic is a future challenge and an opportunity to enhance the mapping and to increase the efficiency as an "avoidance risks tool".

This study considered an urban green element (plane tree) as an element to analyse urban sustainability management and improve human health and well-being (Chou et al., 2016; Salmond et al., 2016). It is necessary to integrate the services that the ecosystems provide in landscape planning in order to achieve one of the Sustainable Development Goals (11-sustainable cities and communities) (UNDP, 2019). Furthermore, this methodology could be developed in other cities to promote new results that allow for more comparisons. It will enable us to gain knowledge to establish actual healthy itineraries with minimum exposure to allergenic pollen grains and to design new urban projects that incorporate topological criteria and optimization methods into urban planning (Ekel and de Vries, 2017; Hilal et al., 2018). This work would be even more beneficial if the last point of the guide focused on a new culture to develop sustainable urban mobility on foot or by bicycle with the objective to provide long-term benefits (Comission-Mobility, 2017) is considered. This new situation would directly increase the exposure of the population to urban green infrastructures. Thus, it is necessary to know the urban natural risk zones, in line with the corrective measures to reduce the impact of urban pollen emissions, including the implementation of nature-based solutions at various levels such as planning and design, handling and management, and strengthening urban green-infrastructure elements (Cariñanos et al., 2017).

5. Conclusions

In this work, a new aerobiological index is proposed, the Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees (AIROT). AIROT is a new tool to assist in urban planning and the assessment of potential allergenicity for urban green infrastructures. For this first study case, the risk of exposure to plane tree pollen in cities within a region (Extremadura) in SW Europe is evaluated as an example to be applied in any urban environment. The AIROT index was shown to be a useful tool to map possible biological risks in cities, considering some variables whose role in aerobiological analysis is unclear, such as the effect of slopes and other geographical features, and the barriers consisting of buildings, in the pollen dispersion process. The proposal of a new aerobiological index considering geographical specifications by engineering techniques of remote sensing (LiDAR) and geostatistics (Kriging) provides a new tool for urban planning. AIROT shows the novelty of allowing the study of each city with consideration of their own characteristics. Moreover, the establishment of risk maps and healthy itineraries (or comfortable areas) can be valuable for allergic patients, allergists, architects and urban planners in order to evaluate

the potential allergenicity of urban green infrastructure and to design mitigation actions.

Acknowledgements

This work was made possible by research projects PRI06A190, PRI BS10008, IB16029, research groups aid GR18113 financed by the Regional Government, Junta de Extremadura (Spain), the European Regional Development Fund, and the Irish Environmental Protection Agency (EPA), by means of a Research Fellowship (programme 2014-2020, Climate, 2017) for JMMM.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.382>.

References

- AEMET, 2018. Climate Statistics. Badajoz Airport (1981–2010). Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España. Retrieved from www.aemet.es.
- Alba, F., Nieto-Lugilde, D., Comtois, P., De La Guardia, C.D., De Linares, C., Ruiz, L., 2006. Airborne-pollen map for *Olea europaea* L. in eastern Andalusia (Spain) using GIS: estimation models. *Aerobiologia* 22, 109–118. <https://doi.org/10.1007/s10453-006-9024-0>.
- Alonzo, M., Bookhagen, B., Roberts, D.A., 2014. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sens. Environ.* 148, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.018>.
- Alvarado, A., Guajardo, F., Devia, S., 2014. *Plantation of Trees in Urban Areas Guide*, vol. 94.
- Barima, Y.S.S., Angaman, D.M., N'Gouran, K.P., Koffi, N.A., Kardel, F., De Cannière, C., Samson, R., 2014. Assessing atmospheric particulate matter distribution based on saturation isothermal remanent magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. *Sci. Total Environ.* 470–471, 975–982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.082>.
- Barnett, J., 2008. Great streets. *Planning* 74, 16–17.
- Bartie, P., Reitsma, F., Kingham, S., Mills, S., 2011. Incorporating vegetation into visual exposure modelling in urban environments. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 25, 851–868. <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.512273>.
- Bayer, D., Reischl, A., Rötzer, T., Pretzsch, H., 2018. Structural response of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) and small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) to varying urban environments analyzed by terrestrial laser scanning: implications for ecological functions and services. *Urban Forestry and Urban Greening* 35, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.08.011>.
- Berens, A.S., Diem, J., Stauber, C., Dai, D., Foster, S., Rothenberg, R., 2017. The use of gamma-survey measurements to better understand radon potential in urban areas. *Sci. Total Environ.* 607–608, 888–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.022>.
- Blanus, T., Fantozzi, F., Monaci, F., Bargagli, R., 2015. Leaf trapping and retention of particles by holm oak and other common tree species in Mediterranean urban environments. *Urban Forestry and Urban Greening* 14, 1095–1101. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.10.004>.
- Blue Marble Geographics, 2016. Global Mapper 16. Retrieved from <https://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php>.
- Bricchi, E., Frenguelli, G., Mincigrucci, G., 2000. Experimental results about *Platanus* pollen deposition. *Aerobiologia* 16 (3–4), 347–352.
- Buccolieri, R., Gromke, C., Di Sabatino, S., Ruck, B., 2009. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons. *Sci. Total Environ.* 407, 5247–5256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.016>.
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., 2011. Urban green zones and related pollen allergy: a review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landsc. Urban Plan.* 101, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>.
- Cariñanos, P., Alcázar, P., Galán, C., Domínguez, E., 2002. Privet pollen (*Ligustrum* sp.) as potential cause of pollinosis in the city of Córdoba, south-west Spain. *Allergy* 57, 92–97. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2002.103261.x>.
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Quesada-Rubio, J.M., 2014. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: a case-study in Granada, Spain. *Landsc. Urban Plan.* 123, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009>.
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M.J., Belmonte, J., Boi, M., Elvira-Rendueles, B., De Linares, C., Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J.M., Pérez-Badía, R., Rodríguez-de la Cruz, D., Rodríguez-Rajo, F.J., Rojo-Úbeda, J., Romero-Zarco, C., Sánchez-Reyes, E., Sánchez-Sánchez, J., Tormo-Molina, R., Vega Maray, A.M., 2017. Assessing allergenicity in urban parks: a nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environ. Res.* 155, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.015>.
- Caynes, R.J.C., Mitchell, M.G.E., Wu, D.S., Johansen, K., Rhodes, J.R., 2016. Using high-resolution LiDAR data to quantify the three-dimensional structure of vegetation in urban green space. *Urban Ecosyst.* 19, 1749–1765. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0571-z>.
- Chen, G., Ozelkan, E., Singh, K.K., Zhou, J., Brown, M.R., Meentemeyer, R.K., 2017. Uncertainties in mapping forest carbon in urban ecosystems. *J. Environ. Manag.* 187, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.062>.

- Chou, W.Y., Lee, C.H., Chang, C.Y., 2016. Relationships between urban open spaces and humans' health benefits from an ecological perspective: a study in an urban campus. *Landsc. Ecol. Eng.* 12, 255–267. <https://doi.org/10.1007/s11355-016-0295-5>.
- Comission-Mobility, E., 2017. General Directorate of Mobility and Transport Investment, Innovation and Sustainability Directorate. Retrieved from <https://pagina.jccm.es/europa/pdf/PUBLICACIONES/2017%20Movilidad%20Urbana%20Sostenible.pdf> MI-02-16-275-ES-N 40.
- Coutts, C., 2016. *Green Infrastructure and Public Health*. Routledge (ISBN-10: 0415711363, 326 pages).
- Della Valle, C.T., Triche, E.W., Bell, M.L., 2012. Spatial and temporal modeling of daily pollen concentrations. *Int. J. Biometeorol.* 56, 183–194. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0412-y>.
- Dian, Y., Pang, Y., Dong, Y., Li, Z., 2016. Urban tree species mapping using airborne LiDAR and hyperspectral data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 44, 595–603. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0543-4>.
- Dindaroğlu, T., 2014. The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover. *Journal Environmental Health Science & Engineering* 12, 130. <https://doi.org/10.1186/s40201-014-0130-6>.
- Duinker, P.N., Ordóñez, C., Steenberg, J.W.N., Miller, K.H., Toni, S.A., Nitoslawski, S.A., 2015. Trees in Canadian cities: indispensable life form for urban sustainability. *Sustainability (Switzerland)* 7, 7379–7396. <https://doi.org/10.3390/su7067379>.
- Ekel, E.D., de Vries, S., 2017. Nearby green space and human health: evaluating accessibility metrics. *Landsc. Urban Plan.* 157, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.008>.
- Fayad, I., Baghdadi, N., Bailly, J.S., Barbier, N., Gond, V., Hérault, B., Hajj, M.E., Lochard, J., Perrin, J., 2015. Regional scale rain-forest height mapping using regression-kriging of spaceborne and airborne LiDAR data: application on French Guiana. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 4109–4112. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326729>.
- Fernández-González, M., Guedes, A., Abreu, I., Rodríguez-Rajo, F.J., 2013. Pla a 1 aeroalérgen immunodetección related to the airborne *Platanus* pollen content. *Sci. Total Environ.* 463–464, 855–860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.062>.
- Fernández-González, M., Rodríguez-Rajo, J., Escuredo, O., Aira, M.J., 2013. Optimization of integrated pest management for powdery mildew (*Uncinula necator*) control in a vineyard based on a combination of phenological, meteorological and aerobiological data. *J. Agric. Sci.* 151, 648–658. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000743>.
- Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J.M., I., S.-P., Gonzalo-Garijo, A., Tormo-Molina, R., 2013. Relación entre la abundancia y distribución de plátanos de sombra en el muestreo polínico en altura y distancia (relationship between the abundance and distribution of plane trees in the pollen sampling in height and distance). *Revista Salud Ambiental* 13, 152–322.
- Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J.M., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, A., 2014. Comparative study of the effect of distance on the daily and hourly pollen counts in a city in the south-western Iberian Peninsula. *Aerobiología* 30, 173–187. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9316-0>.
- Fernández-Rodríguez, S., Skjøth, C.A., Tormo-Molina, R., Brandao, R., Caeiro, E., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, A., Smith, M., 2014b. Identification of potential sources of airborne *Olea* pollen in the Southwest Iberian Peninsula. *Int. J. Biometeorol.* 58, 337–348. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0629-4>.
- Fernández-Rodríguez, S., Cortés-Pérez, J.P., Muriel, P.P., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J.M., 2018. Environmental impact assessment of Pinaceae airborne pollen and green infrastructure using BIM. *Autom. Constr.* 96, 494–507. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.011>.
- Gamba, P., Houshmand, B., 2000. Digital surface models and building extraction: a comparison of IFSAR and LIDAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 1959–1968. <https://doi.org/10.1109/36.851777>.
- Gavarr-Pizarro, G.I., Kuemmerle, T., Hoyos, L.E., Stewart, S.I., Huebner, C.D., Keuler, N.S., Radeloff, V.C., 2012. Monitoring the invasion of an exotic tree (*Ligustrum lucidum*) from 1983 to 2006 with Landsat TM/ETM+ satellite data and support vector Machines in Córdoba, Argentina. *Remote Sens. Environ.* 122, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.023>.
- Gehrig, R., Peeters, A.G., 2000. Pollen distribution at elevations above 1000 m in Switzerland. *Aerobiologia* 16 (1), 69–74. <https://doi.org/10.1023/A:1007607121614>.
- Germino, M.J., Smith, W.K., Resor, A.C., 2002. Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecol.* 162, 157–168. <https://doi.org/10.1023/A:1020385320738>.
- Gillespie, T.W., de Goede, J., Aguilar, L., Jenerette, D.E., Fricker, G.A., Avolio, M.L., Pincetl, S., Johnston, T., Clarke, L.W., Pataki, D.E., 2016. Predicting tree species richness in urban forests. *Urban Ecosyst.* 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0633-2>.
- Golan, A., 2015. The street as urban icon? Tel Aviv Rothschild Boulevard. *Urban Geogr.* 36, 721–734. <https://doi.org/10.1080/02723638.2015.1016308>.
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., Ruck, B., 2008. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – evaluation of CFD data with experimental data. *Atmos. Environ.* 42, 8640–8650. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.019>.
- Guilherme, F.A.G., Silva, M.C., Carneiro, D.N.M., Nascimento, H.C.A., Ressel, K., Ferreira, W.C., 2018. Urban arborization in public pathways of four cities in east Mato Grosso do Sul (MS) Brazil. *Ornamental Horticulture* 24, 174–181. <http://dx.doi.org/10.14295/oh.v24i2.1137>.
- Hilal, M., Joly, D., Roy, D., Vuidel, G., 2018. Visual structure of landscapes seen from built environment. *Urban Forestry and Urban Greening* 32, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.020>.
- Hoekstra, M.J., 2012. The plan Zuid in words: changing notions in urbanism and an unknown plan. *KNOB Bulletin* 111, 186–198. <https://doi.org/10.7480/knob.111.2012.4.353>.
- IGN, 2019. CORINE Land Cover. Instituto Geográfico Nacional del Gobierno de España. Retrieved from <http://www.ign.es/ign/main/index.do>.
- Imai, Y., Setojima, M., Yamagishi, Y., Fujiwara, N., 2004. Tree-height measuring characteristics of urban forests by LIDAR data different in resolution. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, pp. 513–516. Retrieved from <http://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm7/papers/100.pdf>.
- Jenerette, G.D., Harlan, S.L., Buyantuev, A., Stefanov, W.L., Dedet-Barreto, J., Ruddell, B.L., Myint, S.W., Kaplan, S., Li, X., 2016. Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA. *Landsc. Ecol.* 31, 745–760. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0284-3>.
- Johnson, L.E., Bishop, T.F.A., Birch, G.F., 2017. Modelling drivers and distribution of lead and zinc concentrations in soils of an urban catchment (Sydney estuary, Australia). *Sci. Total Environ.* 598, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.033>.
- Kjelgren, R.K., Clark, J.R., 1992. Microclimates and tree growth in three urban spaces. *J. Environ. Hort.* 10 (3), 139–145.
- León Ruiz, E.J., García Mozo, H., Domínguez Vilches, E., Galán, C., 2012. The use of geo-statistics in the study of floral phenology of *Vulpia geniculata* (L.) link. *TheScientificWorldJournal* 2012, 624247. <https://doi.org/10.1100/2012/624247>.
- León-Ruiz, E., Alcázar, P., Domínguez-Vilches, E., Galán, C., 2011. Study of Poaceae phenology in a Mediterranean climate. Which species contribute most to airborne pollen counts? *Aerobiologia* 27, 37–50. <https://doi.org/10.1007/s10453-010-9174-y>.
- Lin, Y., West, G., 2016. Reflecting conifer phenology using mobile terrestrial LiDAR: a case study of *Pinus sylvestris* growing under the Mediterranean climate in Perth, Australia. *Ecol. Indic.* 70, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.003>.
- Lovasi, G.S., O'Neil-Dunne, J.P.M., Lu, J.W.T., Sheehan, D., Perzanowski, M.S., Macfaden, S.W., King, K.L., Matte, T., Miller, R.L., Hoepner, L.A., Perera, F.P., Rundell, A., 2013. Urban tree canopy and asthma, wheeze, rhinitis, and allergic sensitization to tree pollen in a New York city birth cohort. *Environ. Health Perspect.* 121, 494–500. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205513>.
- Luo, S., Wang, C., Xi, X., Pan, F., Peng, D., Zou, J., Nie, S., Qin, H., 2017. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation. *Ecol. Indic.* 73, 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.001>.
- Machida, L., Derera, J., Tongona, P., Mutanga, O., MacRobert, J., 2012. Geostatistical analysis of quality protein maize outcrossing with pollen from adjacent normal endosperm maize varieties. *Crop Sci.* 52, 1235–1245. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.08.0448>.
- Maheshwari, B.L., Plunkett, M., 2015. Best practice irrigation management and extension in Peri-urban landscapes – experiences and insights from the Hawkesbury–Nepean catchment, Australia. *J. Agric. Educ. Ext.* 21, 267–282. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2014.927376>.
- Maimaitiyming, M., Ghulam, A., Tiyp, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, T., Sawut, M., Caetano, M., 2014. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 89, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.12.010>.
- Massetti, L., Petrali, M., Orlandini, S., 2015. The effect of urban morphology on *Tiliaeuropea* flowering. *Urban Forestry and Urban Greening* 14, 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.10.005>.
- Matějček, L., Engst, P., Janour, Z., 2006. A GIS-based approach to spatio-temporal analysis of environmental pollution in urban areas: a case study of Prague's environment extended by LIDAR data. *Ecol. Model.* 199, 261–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.018>.
- Maya-Manzano, J.M., Fernández-Rodríguez, S., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Gonzalo-Garijo, A., 2017. Allergic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban Forestry and Urban Greening* 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>.
- Maya-Manzano, J.M., Sady, M., Tormo-Molina, R., Fernández-Rodríguez, S., Oteros, J., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, A., 2017. Relationships between airborne pollen grains, wind direction and land cover using GIS and circular statistics. *Sci. Total Environ.* 584–585, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.085>.
- Maya-Manzano, J.M., Tormo-Molina, R., Fernández-Rodríguez, S., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, A., 2017. Distribution of ornamental urban trees and their influence on airborne pollen. *Landsc. Urban Plan.* 157, 434–446. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.011>.
- MOPT, 1992. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Manual de plantación en el entorno de la carretera. Retrieved from <http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/4FABE603-6468-4A82-B4C7-D2D0F5F01355/55708/1310100.pdf>.
- Mrdan, S., Ljubojević, M., Orlović, S., Čukanović, J., Dulić, J., 2017. Poisonous and allergenic plant species in preschool's and primary school's yards in the city of Novi Sad. *Urban Forestry and Urban Greening* 25, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.007>.
- Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Khreis, H., Cirach, M., Milà, C., Espinosa, A., Foraster, M., McEachan, R.R.C., Kelly, B., Wright, J., Nieuwenhuijsen, M., 2018. Socioeconomic inequalities in urban and transport planning related exposures and mortality: a health impact assessment study for Bradford, UK. *Environ. Int.* 121, 931–941. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.017>.
- Murgotio, J.J., Shrestha, R., Glenn, N.F., Spaete, L.P., 2013. Improved visibility calculations with tree trunk obstruction modeling from aerial LiDAR. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1865–1883. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.767460>.
- Noh, Y.M., Lee, H., Mueller, D., Lee, K., Shin, D., Shin, S., Choi, T.J., Choi, Y.J., Kim, K.R., 2013. Investigation of the diurnal pattern of the vertical distribution of pollen in the lower troposphere using LIDAR. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 7619–7629. <https://doi.org/10.5194/acp-13-7619-2013>.
- NSI, 2017. Population by Cities. National Institute of Statistics, Madrid, Spain. Retrieved from <https://www.ine.es/>.

- Oteros, J., Bergmann, K.-C., Menzel, A., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C., Buters, J., 2019. Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmos. Environ.* 199, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.045>.
- Parmehr, E.G., Amati, M., Taylor, E.J., Livesley, S.J., 2016. Estimation of urban tree canopy cover using random point sampling and remote sensing methods. *Urban Forestry and Urban Greening* 20, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.011>.
- Plowright, A.A., Coops, N.C., Eskelson, B.N.I., Sheppard, S.R.J., Aven, N.W., 2016. Assessing urban tree condition using airborne light detection and ranging. *Urban Forestry and Urban Greening* 19, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.026>.
- Ponchia, G., Simeoni, S., Zanin, G., 2010. Influence of winter pruning on ornamental plants grown in two kinds of container. *Acta Hort.* 581–584. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.881.97>.
- Puppi Branzi, G., Zanotti, L.Z., 1992. Estimate and mapping of the activity of airborne pollen sources. *Aerobiologia* 8, 69–74. <https://doi.org/10.1007/BF02291332>.
- Puppi, G., Zanotti, A.L., 1989. Methods in Phenological mapping. *Aerobiologia* 5, 44–54. <https://doi.org/10.1007/BF02446487>.
- Ríos, B., Torres-Jardón, R., Ramírez-Arriaga, E., Martínez-Bernal, A., Rosas, I., 2016. Diurnal variations of airborne pollen concentration and the effect of ambient temperature in three sites of Mexico City. *Int. J. Biometeorol.* 60, 771–787. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1061-3>.
- Rohde, R.A., Müller, R.A., 2015. Air pollution in China: mapping of concentrations and sources. *PLoS One* 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135749>.
- Rojó, J., Pérez-Badía, R., 2015. Spatiotemporal analysis of olive flowering using geostatistical techniques. *Sci. Total Environ.* 505, 860–869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.022>.
- Rojó, J., Rapp, A., Lara, B., Fernández-González, F., Pérez-Badía, R., 2015. Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Sci. Total Environ.* 538, 672–682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.074>.
- R-Team, C., 2013. R Core Team. 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Salmond, J.A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., Dirks, K.N., Heaviside, C., Lim, S., MacIntyre, H., McInnes, R.N., Wheeler, B.W., 2016. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health: A Global Access Science Source* 15. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>.
- Scheffinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, Ch., Ahas, R., 2002. Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological observations in central Europe. *Int. J. Climatol.* 22, 1739–1755.
- Senes, G., Fumagalli, N., Ferrario, P.S., Gariboldi, D., Rovelli, R., 2016. Municipal community gardens in the metropolitan area of Milano. Assessment and planning criteria. *Journal of Agricultural Engineering* 47, 82–87. <https://doi.org/10.4081/jae.2016.509>.
- Sharma, C.M., Khanduri, V.P., Ghildiyal, S.K., 2012. Reproductive ecology of male and female strobili and mating system in two different populations of *Pinus roxburghii*. *Sci. World J.* 2012. <https://doi.org/10.1100/2012/271389>.
- Sicard, M., Izquierdo, R., Alarcón, M., Belmonte, J., Comerón, A., Baldasano, J.M., 2016. Near-surface and columnar measurements with a micro pulse lidar of atmospheric pollen in Barcelona, Spain. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 6805–6821. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6805-2016>.
- Sicard, P., Serra, R., Rossello, P., 2016. Spatiotemporal trends in ground-level ozone concentrations and metrics in France over the time period 1999–2012. *Environ. Res.* 149, 122–144. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.014>.
- Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Muñoz-Rodríguez, A., 2000. Influence of wind direction on pollen concentration in the atmosphere. *Int. J. Biometeorol.* 44, 128–133.
- Skjøth, C.A., Ørby, P.V., Becker, T., Geels, C., Schlünsen, V., Sigsgaard, T., Bønløkke, J.H., Sommer, J., Søgaard, P., Hertel, O., 2013. Identifying urban sources as cause of elevated grass pollen concentrations using GIS and remote sensing. *Biogeosciences* 10, 541–554. <https://doi.org/10.5194/bg-10-541-2013>.
- Smith, M., Skjøth, C.A., Myszkowska, D., Uruska, A., Puc, M., Stach, A., Balwier, Z., Chlopek, K., Piotrowska, K., Kasprzyk, I., Brandt, J., 2008. Long-range transport of Ambrosia pollen to Poland. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1402–1411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.04.005>.
- Sreelekha, M.G., Krishnamurthy, K., Anjaneyulu, M.V.L.R., 2017. Fractal Assessment of Road Transport System. European Transport - Trasporti Europei. Retrieved from http://www.istee.org/te/papers/N65/P05_65_08_2017.pdf.
- Staffolani, L., Velasco-Jiménez, M.J., Galán, C., Hruska, K., 2011. Allergenicity of the ornamental urban flora: ecological and aerobiological analyses in Córdoba (Spain) and Ascoli Piceno (Italy). *Aerobiologia* 27, 239–246. <https://doi.org/10.1007/s10453-010-9193-8>.
- Steiner, F., 2011. Landscape ecological urbanism: origins and trajectories. *Landscape Urban Plan.* 100, 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.020>.
- Tang, L., Wang, L., Li, Q., Zhao, J., 2018. A framework designation for the assessment of urban ecological risks. *Int. J. Sust. Dev. World* 25, 387–395. <https://doi.org/10.1080/13504509.2018.1434570>.
- Thomas, S.C., Winner, W.E., 2002. Photosynthetic differences between saplings and adult trees: an integration of field results by meta-analysis. *Tree Physiol.* 22, 117–127. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.2-3.117>.
- Thompson, R.S., 1993. Building amplification factors for sources near buildings: a wind-tunnel study. *Atmos. Environ. Part A* 27, 2313–2325. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90400-S](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90400-S).
- Tong, Z., Baldauf, R.W., Isakov, V., Deshmukh, P., Max Zhang, K., 2016. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Sci. Total Environ.* 541, 920–927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.067>.
- Tormo-Molina, R., Muñoz-Rodríguez, A., Silva-Palacios, I., Gallardo-López, F., 1996. Pollen production in anemophilous trees. *Grana* 35, 38–46. <https://doi.org/10.1080/00173139609430499>.
- Tsui, O.W., Coops, N.C., Wulder, M.A., Marshall, P.L., 2013. Integrating airborne LiDAR and space-borne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass. *Remote Sens. Environ.* 139, 340–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.012>.
- UNDP, 2019. United Nations Development Programme. Sustainable Development Goals. Retrieved from <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>.
- Vaz Monteiro, M., Levanic, T., Doick, K.J., 2017. Growth rates of common urban trees in five cities in Great Britain: a dendrochronological evaluation with an emphasis on the impact of climate. *Urban Forestry and Urban Greening* 22, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.003>.
- Velasco-Jiménez, M.J., Alcázar, P., Valle, A., Trigo, M.M., Minero, F., Domínguez-Vilches, E., Galán, C., 2014. Aerobiological and ecological study of the potentially allergenic ornamental plants in South Spain. *Aerobiologia* 30, 91–101. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9311-5>.

Capítulo III

Producing Urban Aerobiological Risk Map for
Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from
LiDAR Technology

5.5. Capítulo III: Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology.



remote sensing



Article

Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology

Raúl Pecero-Casimiro ¹, Santiago Fernández-Rodríguez ², Rafael Tormo-Molina ¹, Inmaculada Silva-Palacios ³, Ángela Gonzalo-Garijo ⁴, Alejandro Monroy-Colín ¹, Juan Francisco Coloma ² and José María Maya-Manzano ^{5,6,*}

¹ Department of Plant Biology, Ecology and Earth Sciences, Faculty of Science, University of Extremadura, Avda. Elvas s/n, 06071, Badajoz, Spain; raulpc@unex.es (R.P.C.); ratormo@unex.es (R.T.M.); bioamc@outlook.com (A.M.C.)

² Department of Construction, School of Technology, University of Extremadura, Avda. de la Universidad s/n, 10003 Cáceres, Spain; santiferro@unex.es (S.F.R.); jfcoloma@unex.es (J.F.C.)

³ Department of Applied Physics, Engineering Agricultural School, University of Extremadura. Avda. Adolfo Suárez s/n, 06007 Badajoz, Spain; insilva@unex.es

⁴ Department of Allergology, University Hospital of Badajoz. Avda. Elvas s/n, 06080 Badajoz, Spain; magonzalog@gmail.com

⁵ School of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Technological University Dublin, D08 X622, Dublin, Ireland

⁶ Center of Allergy & Environment (ZAUM), Technische Universität München/Helmholtz Center, Biedersteiner Str 29, 80802, Munich, Germany

* Corresponding author: jnmaya@unex.es

Received: 24 March 2020; Accepted: 12 May 2020; Published: 14 May 2020

Abstract: Given the rise in the global population and the consequently high levels of pollution, urban green areas, such as those that include plants in the Cupressaceae family, are suitable to reduce the pollution levels, improving the air quality. However, some species with ornamental value are also very allergenic species whose planting should be regulated and their pollen production reduced by suitable pruning. The Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees (AIROT), in its previous version, already included parameters that other indexes did not consider, such as the width of the streets, the height of buildings and the geographical characteristics of cities. It can be considered by working with LiDAR (Light Detection and Ranging) data from five urban areas, which were used to create the DEM and DSM (digital elevation and surface models) needed to create one of the parameters. Pollen production is proposed as a parameter (α) based on characteristics and uses in the forms of hedges or trees that will be incorporated into the index. It will allow the comparison of different species for the evaluation of the pruning effect when aerobiological risks are established. The maps for some species of Cupressaceae (*Cupressus arizonica*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressocyparis leylandii* and *Platycladus orientalis*) generated in a GIS (geographic information system) from the study of several functions of Kriging, have been used in cities to identify aerobiological risks in areas of tourist and gastronomic interest. Thus, allergy patients can make decisions about the places to visit depending on the levels of risk near those areas. The AIROT index provides valuable information for allergy patients, tourists, urban planning councillors and restaurant owners in order to structure the vegetation, as well as planning tourism according to the surrounding environmental risks and reducing the aerobiological risk of certain areas.

Keywords: AIROT; allergy; Cupressaceae; green infrastructure; risk maps; pollen production; urban ecology

1. Introduction

The global population and consequently the air pollution are increasing [1], negatively affecting to air quality, especially in densely populated areas [2]. Urban forests and green spaces in cities are indispensable for urban sustainability [3] due to their role in mitigating polluting particles [4] and reducing temperatures in urban areas [5]. In addition, these spaces satisfy other important immaterial and non-consumptive human needs, such as fostering positive feelings and helping urban communities articulate their commonly shared values [6,7]. Despite the benefits of urban green spaces, ornamental plants can produce some negative effects on ecosystems, such as problems related to invasive plants [8] and the emission of biogenic volatile organic compounds involved in ozone formation, which can increase smog problems [9]. Moreover, the pollen emission from allergenic plants during the pollination period affects human health, increasing the incidence of respiratory allergies, allergic rhinitis and asthma [10,11].

The family Cupressaceae has great value as ornamental plants, having the ability to capture particle matter, since trees with smaller leaves and more complex shoot structures have been shown to capture larger amounts of pollutants than broadleaved trees [12–14]. However, Charpin et al. [15] indicated that Cupressaceae pollen is the main cause of winter allergic respiratory diseases in central Asian, North American and eastern Mediterranean countries, and it is amongst the major sources of airborne allergens in the Mediterranean region [16]. Furthermore, in the last decades, cypress pollinosis has increased, mainly due to the increasing use of cypress in the form of hedges in private gardens [17] and the interaction of pollen with atmospheric pollutants that come from industrialization and urbanization [18–20]. To try to reduce the problems caused by cypresses, there is a need to carry out information campaigns aimed at the public and local authorities on the importance of cypress pruning [21], suitable planning in the selection of species to achieve healthy urban forests [22] and adequate maintenance of green areas to reduce allergenicity [23].

The examination of Cupressaceae in Extremadura (SW Spain) in the present study is considered another milestone in order to assess new elements of the green infrastructure after our previous study with *Platanus* sp. [24]. This is a genus that has specific patterns in its pollination, since it occurred at a specific time for a short duration (and in an explosive way) [25]. However, the periods of pollination in the studied Cupressaceae species (*C. sempervirens*, *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *Cupressocypariss leylandii* and *Platycladus orientalis*) range from October to April and May [15], although in our work we report a longer period until June for *C. Leylandii*. It prompts allergic symptoms over a longer interval, since newly released pollen is added to already existing airborne concentrations [23]. In addition, the size and use given to each specimen are not the same for these species, which causes pollen production to vary. This indicates that it is not the same when a specimen is used in the form of a hedge, with pruning, and measuring up to 2 m, while another is a specimen with normal growth and development without pruning. This makes it very important to predict their pollen production and possible aerobiological risks within cities.

The mapping of aerobiological sources serves as a reference for decision making in urban planning [24]. Despite having gaps in this understanding, in the field of construction it is starting to be used to study pollen exposure in the designs of new construction [26]. This is because city buildings influence pollen dispersal [27], being able to produce high concentrations of particles in some places [28].

LiDAR (light detection and ranging) has been useful for mapping possible biological risks in cities, considering slopes and geographical characteristics, the influence of buildings and other barriers within cities and their effect on pollen dispersion [24]. In addition, this technology is increasingly used in urban planning and land use [29] and for the study of the height and density of tree canopies [30]. On the other hand, Kriging is an interpolation method used as a geostatistical tool to create risk maps in different fields of research, such as in the chemical prediction of soil composition [31], in phenology [32], for the creation of aerobiological risk maps [24] or more recently to locate critical points of atmospheric pollutant concentrations in urban and peripheral areas [33]. The combination of these tools, together with the use of indexes in aerobiology, specifically AIROT [24], will allow for the creation of a new risk map that will help to provide information on the most

harmful places for allergy patients. In addition, this approach can serve to provide basic information for the creation of healthy itineraries in cities [34].

The aims of this work were to put into practice the aerobiological index AIROT with species within the Cupressaceae family. We must consider that there are differences in the use of each species (hedge, bush or tree) and therefore, in the size that they present. These differences, in addition to other characteristics for each species, mean that the production of pollen for each species will not be the same and therefore, neither will be the risk of exposure. To solve this problem, it is proposed to introduce a parameter that will consider the pollen production of each species and its contribution to the Cupressaceae airborne pollen spectrum. If the calculations were made without taking into account the pollen production of each species and specimen, it would not be possible to observe how much each specimen contributes to the value of the index. Furthermore, the representation of risk maps in different months is necessary since not all species pollinate at the same time. Therefore, the phenology of this production will be known, which will allow comparing of the potential aerobiological risk of sources for different species. In short, a parameter that will take into account the use and size of the specimen and in which the pollen production for each species is incorporated. Considering the AIROT index values and the geolocation of these ornamental plants, we propose to create risk maps for the Cupressaceae species in the southwest of the Iberian Peninsula.

2. Material and Methods

2.1. Sampling Site

The cities studied; Badajoz (BA), Cáceres (CC), Don Benito (DB), Plasencia (PL) and Zafra (ZA), are located in the SW Iberian Peninsula (Table 1). Extremadura region is an extensive territory (41,635 km²), with 1,070,586 inhabitants [35] and two provinces, Cáceres and Badajoz. The climate is continental Mediterranean, with an average annual temperature of 17.1 °C, and annual rainfall of 447 mm [36]. Agriculture is predominately (that which occupies most of the surface of the region) irrigated and dry farming. As for the surface occupied by natural species, most of it belongs to *Quercus rotundifolia*, *Quercus suber*, *Quercus pyrenaica*, *Castanea sativa*, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus globulus*.

The studied species (*Cupressus arizonica*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressocyparis leylandii* and *Platycladus orientalis*) of the Cupressaceae family are widely used in the different cities of the region in parks, public and private gardens and in the villas of the urbanizations of the cities. One of the most common forms of use is in the form of hedges, mainly for *P. orientalis* and *C. arizonica*. *C. sempervirens* are also widely used in cemeteries. Cáceres was the city in which the largest number of specimens have been located (3930), followed by Zafra (1742), Badajoz (1227), Don Benito (822) and Plasencia (732), whose urban areas in km² are 13.6, 3.5, 15.4, 4.3 and 4.8, respectively.

Table 1. Location of the cities studied.

City	Coordinates	m.a.s.l
Badajoz (BA)	38°53'N, 6°58'W	184
Cáceres (CC)	39°48'N, 6°20'W	459
Don Benito (DB)	38°58'N, 5°50'W	253
Plasencia (PL)	43°10'N, 2°25'W	253
Zafra (ZA)	38°25'N, 6°25'W	508

2.2. Species of Cupressaceae Family Studied, Characteristics and Their Uses.

The Cupressaceae family includes about 160 species with a common pollen type [37], but different pollination periods (Table 2). The studied species in this work, cultivated in the locations as ornamentals, are:

-*Cupressus sempervirens*: It is a perennial tree native to the eastern areas bathed by the Mediterranean, also known as common cypress. This tree has a height between 25–30 m with

pollination from February to March. The average studied heights in this case are between 15–20 m. It is usually cultivated as a tree and sometimes as hedge.

-*Cupressus arizonica*: Originally from the South of the United States and the North of Mexico. This tree has a height of 20 m (in this case between 10–15 m), although this can be used as a hedge as well. Pollination is from January to March. In the cities studied, this species is used both as a tree and hedge.

-*Cupressus macrocarpa*: It is also known as Monterrey Cypress. This tree can have a height of between 25–30 m (between 15–20 m in Zafra). The pollination occurs in February and March; it is originally from North America and used as a tree.

-*Cupressocyparis leylandii*: It is a natural bigeneric hybrid between *Cupressus macrocarpa* and *Chamaecyparis nootkatensis*. This ornamental plant reaches a size between 20 and 25 m high, although its main use is in the form of hedges, considering the cities studied. The pollination is at the end of the spring (May and June), according to the results obtained by the authors in a phenological follow-up study, although it is necessary to make a more concrete study since it can vary depending on the latitude and in general their pollen production is very low.

-*Platycladus orientalis* (*Thuja*): Originally from China. It is a tree that measures about 8–9 m, although in Spain it is very common as a hedge. Its pollination is in January and February.

Table 2. Pollination periods for all the considered species in this work.

Species	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
<i>C. sempervirens</i>						
<i>C. arizonica</i>						
<i>C. macrocarpa</i>						
<i>C. leylandii</i>						
<i>P. orientalis</i>						

2.3. LiDAR Data

LiDAR data were used to create the DEM (digital elevation model) and DMS (digital surface model) necessary to perform visibility analysis (used in AIROT as potential dispersibility). With this aim, groups of LiDAR images of 2 km × 2 km were obtained for each urban area (dated in 2010, being the only database available up to date for this region) with a LiDAR point density cloud of 0.5 points/m³, downloaded from the website of the National Geographic Institute [38] in LAS (LASer) files, a file format designed to archive LiDAR point cloud data. LiDAR technology is very useful in the construction of these digital models, to consider the buildings, trees and other possible obstacles or barriers in creation of DSM with high precision and excellent resolution, and especially characterization of the shape of each building [39].

2.4. Adaptation of the Risk Index AIROT for Cupressaceae Family

The Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees (AIROT) was firstly proposed to establish comparisons in the risk for pollen exposure coming from plane trees [24]. In this study, the AIROT index is developed for some selected species of the Cupressaceae family for which some adaptation of the index itself has been made considering the physical and biological features of each ornamental plant, as well as the phenology of the species and its pollen production. In addition, physical aspects of the city were considered, such as the places where the trees appeared, the forms of the streets, elevation and slopes obtained from the LiDAR (because they determine the potential dispersion for pollen grains) and other biological characteristics (the degree of maturity and number of specimens) of each sampling point. These parameters and the characteristics of the urban street design are proposed by the new equation (1) to give value to the aerobiological risk of the different areas of the city. This AIROT value does not indicate the pollen concentration of the place or of each source, although it considers the pollen production of the specimens, but rather shows the exposure risk in each point taking into account the parameters indicated. After being represented on the maps, the aerobiological risk of each zone is shown, but not the pollen concentration.

$$AIROT = \sum_{i=1}^n \frac{PD_i \cdot (N_i \cdot \alpha_i) \cdot M_i \cdot Sh_i \cdot H_i}{ST} \quad (1)$$

where,

PD_i = potential Dispersibility (0, 10);

N_i = number of specimens by distance (specimens/ha) (from 0 to 10);

α_i = pollen production according to the species and use (0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 1);

M_i = maturity degree for each specimen (1, 5, 10);

Sh_i = incidence and presence of high buildings, narrow streets and squares (1, 2, 4, 6, 8, 10);

H_i = height above sea level (1, 2);

ST = total surface of the city in km²;

i = each street considered.

This index was normalized considering values between 1 (maximum risk in red) and 0 (minimum risk in green) [24]. The maximum values will be reached in sampling points where there are a high number of adult specimens, in large parks or avenues with large areas, and that are directly exposed to Cupressaceae pollen. The minimum values will be found in places without the presence of Cupressaceae and in narrow streets. However, it is not considered a null category, because the authors consider that a minimum presence of pollen can be caused by the existence in streets close to those studied or by resuspension process. The parameters taken into account for the index calculation are detailed in the following sections:

2.4.1. Potential Dispersibility (PD)

This factor is a theoretical indicator of potential pollen dispersion and transport from one place to another and establishes the extent to which a nominated feature may be seen from a specified location [40]. This parameter was obtained using commercial GIS software and doing a visibility analysis using the "View Shed" tool, where you must enter a height value as z coordinate (m) that indicates the elevation of each transmitter point (ornamental sources). This analysis takes into account buildings, trees and any other obstacles around the selected Cupressaceae specimens that may act as possible barriers to pollen dispersal and that have been obtained by the DSM created from the point cloud LiDAR.

The height from which the trees can be considered as mature and therefore to produce pollen depends on each species. Heights of 5 m have been established for plane trees [24] and from 5 to 20 m for the birch [41]. However, the height of the plants to be observed in this work, varies between 1 and 25 m, because it is the height range in which is contained at least 95% of the plants sampled.

Consequently, to make the visibility analysis, the coordinate z was replaced in each case by the values of height in meters at which species begin to mature. This value was not the same for all species, since not all reach maturity with the same height as indicated in table 3. The values that were considering following the maturation sizes of each species according to Talhouk et al. [42], are: *C. arizonica*: 5 m; *C. Macrocarpa*: 10 m; *C. Sempervirens*: 10 m; *C. Leylandii*: 5 m and *P. Orientalis*: 3 m. This height value is a general value per species and was only used to make the visibility analysis using GIS. Then, for the calculation of parameters M and α the values used to specify each category also correspond to that height for each species. Each one of the pollination months of the Cupressaceae species were taken into account independently because different species pollinate each month. Nonetheless, the scores given to PD are in absolute terms, as exposed (10) or not exposed (0) areas. The average scores were not considered either [24].

2.4.2. Number of Specimens by Surface (specimens/ha) (N)

The presence of vegetation sources is an important factor that influences the pollen load in an area [43]. We calculated the density of specimens in each street for each of the species (specimens / ha), and these were given normalized values from 0 to 10 [24]. For the normalization of the values, the maximum value (400.75 specimens/ha) and the minimum value (0.02 specimens/ha) were taken into account, which were given the normalized values of 10 and 1, respectively, 0 represents the streets in which there are no pollen sources. Then, the proportionality constant was obtained, which in this case is approximately 40. In this work all city specimens have been considered and geolocated.

2.4.3. Pollen Production according to the Species and Use (α)

This is a relevant performance in the AIROT index, considering the species chosen with different pollen production [44]. The α parameter is a theoretical-numerical parameter that will allow the calculation of the AIROT index [24] by comparing different species which have different pollen production. Its value will be between 0.001 and 1, being calculated considering the pollen production for each species. The species with the highest pollen production will be assigned the value of 1, and 0.001 for the species with the lowest production. The inclusion of this parameter in the AIROT index adds great value to the index due to the pollen production, being this relevant for the risk of exposure when we talk about different species. This approach is very important, since to a large extent, the potential risk of the source will depend on the concentration of pollen generated. This parameter was not previously included because *Platanus* sp. had similar pollen production.

C. macrocarpa is the one with the highest pollen production [23,44], being assigned a value of 1. The value 0.001 will be assigned to specimens in the form of hedges, as some authors consider the effect pruning to reduce pollen production [43], this phenomenon being observed for Cupressaceae [45]. Other researchers have argued that pollen production can be eliminated in some types of Cupressaceae, such as the *Thuja*, when it is regularly pruned [44]. However, some authors, years later, studied Cupressaceae for its allergenic effect [23,46]. The authors of this work consider that species used as hedges continue to produce pollen, even if it is at a very low quantity. The species *C. arizonica* and *C. sempervirens* were assigned a value of 0.1 and 0.05, respectively, considering as a reference the study by Hidalgo et al. [44] in which the species of *C. macrocarpa*, *C. arizonica* and *C. sempervirens* were compared, taking into account their pollen production and they assigned the values of 1, 0.1 and 0.05, respectively. Furthermore, the work carried out by Damialis et al. [47], in which they argue that *C. sempervirens* produces very similar amounts of pollen at the flower level anywhere influenced by the Mediterranean climate or even in climatically similar areas in the world, was also taken into account.

Last, *Cupressocyparis leylandii* was assigned a value of 0.01 because, according to the authors, the level of pollen production is very low, although further work is needed. Finally, *Platyclusus orientalis* was assigned a value equal to that of *C. sempervirens* (0.05) because, according to the authors, its behaviour regarding pollen production is similar. However, this value should be studied in greater detail in the future.

2.4.4. Degree of Maturity for Each Specimen (M)

This parameter has been considered to be essential in assessing the potential to release pollen [43], following the previous work on the plane trees. In this case, there is not much literature discussing the age at which the species of the Cupressaceae family reach maturity. Verdú [48] made estimates for the genera *Cupressus* and *Thuja*, establishing an average age of 7.1 and 13.0 years, respectively, to reach maturity, but it is not easy to calculate the age of maturity of these species. However, other authors used height to predict the growth and maturation of herbaceous plants [49], as well as the amount of biomass [50,51] and production [52,53]. Talhouk et al. [42] described certain heights at which these species begin to mature and the heights that they reach once they are mature (Table 3). Using the data in this table, the values of the "M" parameter (1; 5; 10) for each species were established (Table 3). For hedges, a value of 1 was given because although they may be old enough to have a higher score within this parameter, pruning is controlling their pollen production.

Table 3. Height at which the studied species begin to mature and height when they reach the maturity [42] and values of the "M" parameter of our index according to the heights.

Species	Height (m)		Values "M" (expressed in meters height for specimens)		
	Spread at maturity	Maturity	Young (1)	Adults (5)	Mature (10)
<i>C. sempervirens</i>	10–15	15–23	<10	10–15	>15
<i>C. arizonica</i>	5–8	8–15	<5	5–8	>8
<i>C. macrocarpa</i>	10–15	15–23	<10	10–15	>15
<i>C. leylandii</i>	5–8	8–15	<5	5–8	>8
<i>P. orientalis</i>	3–5	5–8	<3	3–5	>5

2.4.5. Incidence and Presence of High buildings and the Size of Streets (Sh)

This parameter has the same values as in the case of plane trees [24], since the sampled cities are the same. The assigned values were as follows: local residential/office/commercial/industrial street: 1; parkway: 2; boulevard: 4; main street: 6; wide avenue: 8 and parks or public squares: 10. To distinguish between avenues and wide streets, the number of transit lanes was considered as an easy and objective indicator, with 4 or more lanes considered to be avenues. We also considered avenues with parks and those with greater widths (4 traffic lanes plus parking and sidewalks) to fall within the category of parks or public squares. The width of the streets, as well as the height of buildings, constitute a physical barrier that hinders the dispersion of pollen grains [28]. In narrower streets, the pollen grains will have less dispersion than in avenues or squares, so these values are assigned to it. The value of this parameter is specific to each specimen since the value corresponds to the street in which it is planted. This means that when different species are considered in different months, this parameter has different mean values for each month because the specimens considered are not the same, so neither are these values.

2.4.6. Height Above Sea Level (H)

As already mentioned in our previous work [24] and according to Scheifinger et al. [54], at a local or regional scale, changes in phenological time series can be induced by micro-meteorological conditions in mountainous areas (20–40 days every 1000 m of elevation). The authors grouped the sampled locations into those of height >1500 m or height <1500 m above sea level. This is consistent with the findings of Sharma et al. [55], who estimated an average production of pollen cone per tree of $42.44 \pm 8.32 \times 10^3$ at lower altitudes and $28.1 \pm 0.89 \times 10^3$ at higher altitudes. We proposed to use the same two categories previously mentioned in Scheifinger et al. [54], using values of 1 for higher altitudes (sampling points within the city >1500 m.a.s.l) and 2 for lower altitudes (places within the city <1500 m.a.s.l). This parameter can be useful to distinguish the behaviour of phenology and pollen

production in places where there are emission sources are both under and over 1500 m height, and it also makes possible the use of AIROT index for different places and the subsequent comparison between them, including different countries and different bioclimatic regions.

2.5. Kriging and Risk Maps

Kriging technique is performed by means of complex mathematical algorithms and equations in order to obtain values in places where there were no sampling points. To obtain these values, the technique uses semivariogram calculations in which the nearby points are taken into account and around 40 of the closest values were used to estimate the scores in areas close to the studied specimens and commercial GIS software was used for this. Five different functions were compared (stable, circular, spherical, exponential and *Gaussian*) (supplementary materials Table S1) and tested until the best aptitude for the points was found, according to the values for the root-mean-square error (RMSE) and Spearman's rank correlation that were obtained by using the R statistical software [56] for the observed values, according to our AIROT calculations against the predicted values by our model for the same points. Then, ordinary Kriging took into account the different points and the z coordinate (AIROT index). Then, points were created for the streets, indicating whether or not they had specimens of Cupressaceae. For each city, maps were made for different months of the year (Figures 1–2 and S1–S5), corresponding to the months in which the different species under study are pollinated (Table 2). These are January (JAN), February (FEB), March (MAR) and May–June (MAY/JUN). Table 5 shows the specimens considered for each map and city and that were used for Kriging.

2.6. Healthy Maps

Knowing where it is possible to walk within a city is very important for allergic people, because avoiding exposure is a good way to prevent symptoms [57]. A healthy itinerary was established for the city of Badajoz to indicate where one might move around the city while avoiding high-risk areas during the pollination of the plane trees [24].

Cáceres is a place of great tourist importance where, for example, there are some of the best restaurants in Extremadura and also in Spain [58]. In the present study, another example of the use of these healthy itineraries was proposed, and a risk map was obtained following the guidelines established for the previous map created for Badajoz. In this work, simulated restaurants in Cáceres were created, and they were located such that, in times of greater risk, they could be avoided by people who are allergic to Cupressaceae. In addition, a tourist risk map was created for Badajoz, where theoretical buildings of tourist interest (cultural buildings, hospitals, schools, etc.) were placed, using as a basis, the risk maps for the Cupressaceae family. In this way, the tourists will have information about the places that are of higher risk due to their exposure to pollen sources.

These are only examples of the many utilities that risk maps have, since as Stephenson and Taylor [59] stated, travelling can increase the chances of the traveller becoming ill. Thus, an important part of the planning for any trip it is to observe the risks that exist in the destination and/or along the itinerary.

3. Results

3.1. Values for the AIROT

Table 4 shows the average values of the parameters used in the AIROT, normalized from 0 to 10 for N, M and Sh, and normalized from 0 to 1 for the parameter α and the value of AIROT. The highest AIROT values for the month of January (JAN) were collected in Plasencia (0.491), followed by Badajoz (0.093), Cáceres (0.022), Zafra (0.014) and Don Benito (0.004). Plasencia has the highest value due to the influence of the parameters N and Sh. Although Plasencia had a low number of specimens (Table 5), they were located very close, as indicated by the value of N, and they are also found in large areas, such as parks and avenues (Sh). Badajoz had the second highest AIROT value, which stood out

precisely in the other two parameters: M and α , which had values two and three times higher, respectively, than Cáceres, which is the city in which these parameters reach the second highest score.

Table 4. Average values of some parameters (M, N and Sh) used in Index to create Risk maps for Ornamental Trees (AIROT) (normalized values from 0 to 10) and values for the α and AIROT (from 0 to 1).

City	Maps.	Number of Specimens (N)	Maturity of Specimens (M)	Shape of Street (Sh)	Pollen Production (α)	AIROT
JAN	Badajoz	1.288	2.419	6.454	0.032	0.093
	Cáceres	4.856	1.072	6.381	0.009	0.022
	Don Benito	2.537	1.023	9.363	0.002	0.004
	Plasencia	5.362	1.000	8.547	0.001	0.491
	Zafra	4.538	1.003	6.163	0.003	0.014
FEB	Badajoz	1.364	4.157	7.636	0.055	0.052
	Cáceres	4.083	1.921	7.213	0.019	0.018
	Don Benito	3.155	2.806	9.431	0.018	0.159
	Plasencia	4.866	1.654	8.411	0.075	0.041
	Zafra	4.697	2.691	6.650	0.021	0.014
MAR	Badajoz	1.351	4.510	7.743	0.062	0.057
	Cáceres	4.114	1.985	7.195	0.020	0.019
	Don Benito	2.926	3.133	9.419	0.022	0.188
	Plasencia	4.912	1.673	8.572	0.077	0.041
	Zafra	4.284	3.243	6.840	0.028	0.019
MAY/JUN	Badajoz	1.315	1.000	8.847	0.010	0.510
	Cáceres	3.325	1.264	4.241	0.002	0.041
	Don Benito	3.077	1.000	8.615	0.004	0.511
	Plasencia	1.000	1.276	10.000	0.006	0.181
	Zafra	2.132	1.000	5.405	0.001	0.353

Table 5. Number of points (specimens) taken for each map and city.

Maps	JAN			FEB			MAR			MAY/JUN
Species	A*	O*	A*	M*	O*	S*	A*	M*	S*	L*
City										
Badajoz	210	103	210	20	103	691	210	20	691	203
Cáceres	1770	225	1770	7	225	1439	1770	7	1439	489
Don Benito	397	124	397	-	124	288	397	-	288	13
Plasencia	309	20	309	47	20	327	309	47	327	29
Zafra	806	378	806	12	378	340	806	12	340	206

A*: *C. arizonica* / L*: *C. leylandii* / M*: *C. macrocarpa* / O*: *P. orientalis* / S*: *C. Sempervirens*

For the month of February (FEB), Don Benito (0.159) had the highest value of AIROT due to the breadth of its streets, the density of the trees and the maturity of the specimens. Badajoz (0.052), Plasencia (0.041), Cáceres (0.018) and Zafra (0.014) were the remaining cities and had the lowest values because their specimens were in narrower streets than the other cities. Nevertheless, these cities still presented high values for this parameter. Don Benito also had the highest value for March (MAR) (0.188), followed by Badajoz (0.057), Plasencia (0.041), Cáceres and Zafra, both with a value of 0.019. When we again examined the contributing facts, we found that the breadth of the areas where these specimens were located in Don Benito (9.419) was decisive compared to other cities, as was maturity. In comparison with the two cities that obtained a lower value for MAR, Cáceres stood out for having the lowest α value and the second lowest value of M.

For the months May–June (MAY/JUN), Don Benito again had the highest average value (0.511), with Badajoz (0.510) having practically the same, followed by Zafra (0.353), Plasencia (0.181) and Cáceres (0.041). For MAY/JUN in particular, Don Benito did not have any parameter that was higher than those observed in the other cities, but almost all the values of the parameters were close to the maximum values of the other cities. The rest of the cities, although they had some parameters higher than Don Benito, presented other parameters with very low values. This shows the importance of all the parameters in the index, since maximum values in one parameter do not necessarily give rise to maximum AIROT values, however, medium–high values in all its parameters, it can give rise to maximum values of AIROT.

3.2. Risk Maps

Table S1 shows the results of the Kriging analysis. For Badajoz and Zafra, the exponential model was the best for the four maps (JAN, FEB, MAR and MAY/JUN). Although the Spearman's rank coefficient was very similar in all functions for MAY/JUN in Badajoz and even 0.001 greater for the stable and Gaussian models, the one with the lowest RMSE was the exponential model. For Cáceres, the exponential model was also the best suited for almost all maps except the FEB map, for which the optimal function was stable. However, for Don Benito, different models were used for each map: stable (JAN), circular (FEB), exponential (MAR) and Gaussian (MAY/JUN). Plasencia obtained better values for the circular (JAN and MAR), spherical (FEB) and Gaussian (MAY/JUN) models.

Figures 2A, B and S1 to S5 show the risk of aerobiological exposure in each city for each of the months in which the species were being pollinated. The highest values of the index were located in places where the species with the highest pollen production (highest α) were found, as seen in Figures 2A, S1B,C, S2C, S4B,C and S5B,C, where the zones of greater risk coincided with specimens of *C. macrocarpa*. There were also high values in places where, in addition to a high α , a large number of specimens, mainly *C. arizonica* (Figures S1A, S2A, S3A, S4A and S5A) and *C. sempervirens* (Figures S3B,C), were clustered, particularly those that were mature.

In the five maps from MAY/JUN, the high values coincided with the maturation of the *C. leylandii* specimens and their use in the form of trees rather than hedges (Figures S2D and S3D) when there was a high number of specimens (Figures S1D and S5D) or when the dispersion zones coincided with large avenues, parks and squares (Figures S4D) due to the lack of obstacles to dispersion in areas where the specimens were mature.

The medium–high values were found in places where many specimens (Figures S1B,C and S5D) coincided or where they had average values for both pollination and maturation (Figures S1A, S3B,C, S4C and S5C). The average risk values on the maps were clustered mainly around high- or medium–high risk areas that were near open places that favour pollen dispersion and the consequent exposure risk (Figures 2A, S1B,C, S2C,D and S3B,C) and where many specimens coincide (Figures S2A,D, S5A and S5B). Finally, low-risk values occurred when there were a low number of specimens, specimens that were not very mature and those whose α was low due to their use as a hedge (Figures S2A and S3A).

In general, the low- to high-risk areas were located in the centre of the cities, due to their use as ornamental plants in parks and gardens, and on the periphery of urban areas, due to their use as

hedges around buildings in new developments and around cemeteries, given the traditional planting of *C. sempervirens* in these places.

On the other hand, Figure 2A represents the aerobiological risk of the city of Cáceres for the month of February calculated from AIROT using the parameter α , while Figure 2B represents the aerobiological risk of the same city and month calculated from AIROT but without using the parameter α . Figure 2A shows red areas (high aerobiological risk) coinciding with *C. macrocarpa* specimens, while Figure 2B does not represent areas of high risk. Furthermore, the medium-high risk areas (orange) occupy less surface in figure 2A than in figure 2B. In addition, Figure 2A shows medium-high risk (orange) in the northern part of the city, which coincides with the existence of *C. sempervirens* and medium-low risk (olive green) in the eastern zone, where there are hedges of *C. arizonica*, while Figure 2B shows medium risk in the same northern point and medium-high risk in the eastern zone.

Aerobiological risk maps based on the AIROT index can have many applications, including to locate on these maps those places of tourist interest in order to provide an informative tool to tourists. In this way, tourists will be able to observe which places of interest are in high-risk areas in order to avoid them or prevent possible exposure to their allergens. As an example, the risk maps created for Badajoz were used to create Figure 1, where 12 theoretical places of tourist interest are represented. The species under study pollinate in different months, and for this reason in Figure 1 one can see points of interest that in the JAN map are in areas of high or medium-high risk (tourist points 1 and 3), but in MAY/JUNE, completely lack risk. However, other points that did not show risks in JAN (Tourist Point 9), in FEB, had medium risk. In this way, tourists can decide to visit the city on dates during which the points of interest have the lowest possible aerobiological risk. The second application can be seen in Figure 2C, where theoretical restaurants are represented in Cáceres. In this case, one has the option of choosing a restaurant depending on the area where it is located, considering the aerobiological risk conditions as far as pollen is concerned. This should be taken into account if you want to eat outdoors or to avoid areas of high aerobiological risk while arriving at the restaurant.

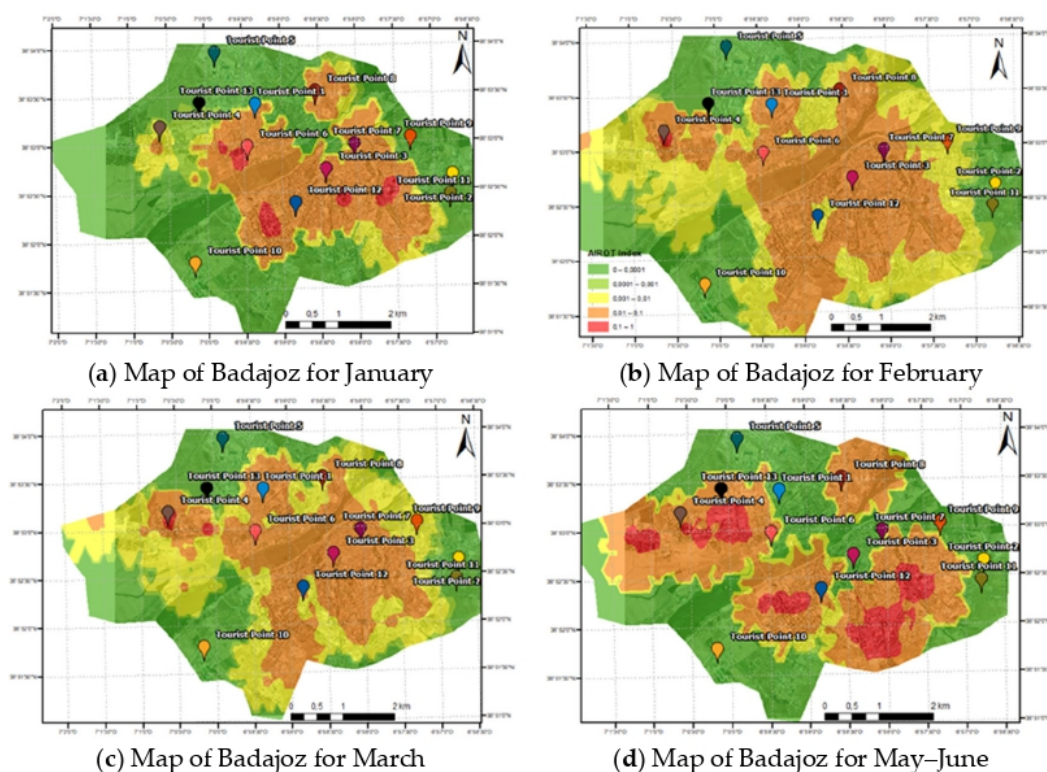


Figure 1. Tourist risk maps of Badajoz for the months of January (a), February (b), March (c) and May-June (d) according to the AIROT index and created using Kriging.

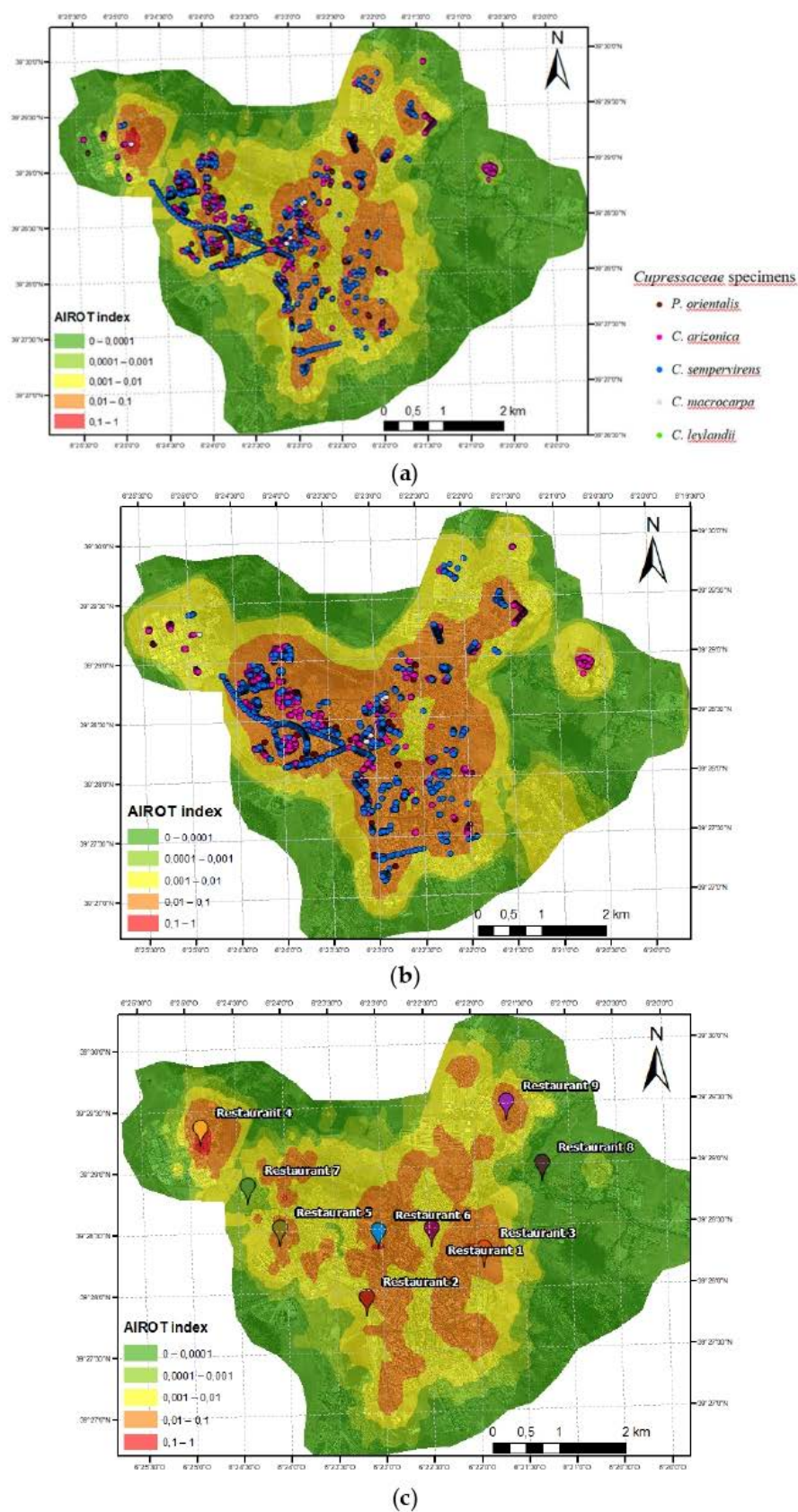


Figure 2. Risk maps of Cáceres for the month of February according to the AIROT index in which are indicated: (a) risk map taking into account the parameter α , (b) risk map without including the parameter α , and (c) restaurants risk map.

4. Discussion

Green spaces in cities are indispensable for people's lives, with numerous benefits, but their proper planning and their positioning within cities are also important. Therefore, optimal green spaces planning should include not only the benefits but also the problems, such as the risks associated to allergenic pollen exposure. The Cupressaceae family has high allergenic levels in winter [60]. In addition, this family of plants is increasingly used in public spaces and private gardens. For these two reasons, it was the focus of this work. The AIROT index [24] calculates the aerobiological risk of these species, and Kriging was used to create exposure risk maps. We implemented some adaptations in the methodology and changes in the index, since these species have different development in terms of size and ornamental uses (hedges or trees) and therefore, different pollen production.

The PD parameter must be calculated for each city, species and month, since each city has its own constructions and characteristics, and each species has a unique maturation size and timeframe for pollination. This parameter tries to show the places where pollen grains can move from their ornamental sources, in view of the characteristics of the sources and characteristics of the city in the vicinity of those sources (the width of the streets, the height of the buildings and the terrain orography). Wind and other meteorological conditions are not considered, firstly, due to difficulty in capturing these variables continuously in several areas within the city and, secondly, because the aim of this work was to locate the areas where there is risk of exposure to pollen due to the proximity of the sources and the characteristics of the city itself, regardless of the different meteorological variables. It is clear that the direction of the wind influences the dispersion of pollen from one place to another, as it has already been considered in previous studies on the same five cities [34] and their surroundings [43,61]. It is also evident that wind can cause pollen to move to places where it would theoretically otherwise not reach and without sources. Due to the influence of meteorological parameters (including wind) and resuspension phenomena, null risk areas were not considered. The visibility analysis considered the possible changes in the dispersion of the pollen caused by the air currents that occur between the streets and how the barrier effect produced by the buildings. With this tool, we can evaluate whether there are some points that are more exposed than others depending on these effects.

The maturity of the specimens is also a very important characteristic of the sources, one that directly influences the concentration of pollen produced. There are studies in which height was used to predict the growth and maturation of herbaceous plants [49]. Therefore, also based on Table 3 [42], the values of the M parameter (1; 5; 10) were established for each species that are shown in the same table. However, the hedges were omitted from this table, since their heights would always be similar due to pruning, therefore making it difficult to estimate their exact age and degree of maturity. In any case, those data would not be very problematic because, as hedges are continuously pruned, their pollen production is very low. This is why they were assigned as M=1. The reason for estimating the maturity of the specimens is to be able to make approximate calculations of their pollen production.

The parameter α has been included to address the need for including the pollen production of the studied species, since species with different sizes and uses differ in pollen production [44]. In addition to assigning values of 0.05 to *P. orientalis* and 0.01 to *C. leylandii* (due to the low pollen production of this species, according to phenological studies carried out by the authors in Badajoz), a value of 0.001 was assigned to species used in the form of hedges. This reflects the way that pruning effects on pollination according to the authors of the current work, because there is still slight pollen production in pruned specimens and that is why this casuistry should be included, even with low values. There are researchers that consider pruning to be a tool for reducing pollen production [21]. Therefore, pruning should be taken into account to promote urban sustainability, improving human health and well-being and regulating air quality [62]. In this way, more specific comparisons and measurements of aerobiological risk changes due to pruning are needed for ornamental plants in the future.

Including this parameter in the AIROT index will allow others in the future to create risk maps for cities in which the main species that cause allergy problems are implemented depending on the

season of the year. It would be necessary to establish for each of these species an α value that estimates their phenological production. Then, according to the other parameters of the AIROT index, risk maps that serve as informative tools for the population could be created. The pollen production (α) and, therefore the phenology of the plants has not been included in the previous case of the plane trees [24] or in the Urban Green Areas Index (IUGZA) [23]. However, phenology and pollen production are very important factors to consider since the use of plants with high pollen production capacity could increase allergenicity [23]. This pollen production also influences aerobiological risk, and therefore AIROT, as shown in Figures 2A,B. In the first, the high-risk area coincides with specimens of *C. macrocarpa*, the species considered to have the highest pollen production in this and other studies [23,44]. However, for the second figure, the high risk area is located slightly in the western part of the city where there is the greatest accumulation of specimens, regardless of the species and the use in the form of a hedge, shrub or tree. Due to studies of pollen production [44] and observations made by the authors on specimens from cities, it is known that the species have different pollen production and that their pollen production is also reduced due to the effect of pruning [43], so it influences aerobiological risk. After this study, the AIROT will allow for the comparison of aerobiological risks between different cities, as was the case in the previous version, and the consideration of different species that coincide in their pollination period.

Another parameter to highlight is N (density of specimens). This parameter was included in the AIROT equation (1) due to its importance in measuring the aerobiological risk, but in such a way that the total number of specimens in the city was less appropriate than the number of specimens per hectare (ha). There are studies in which the number of specimens per street [63] was examined, but the concentration of trees in a given space is also important. Therefore, it was decided to use the value of specimens per hectare as an objective measurement of the number of specimens throughout the city. The results for MAY/JUN in the present study serve as an example. Don Benito had very few specimens (13), as seen in Table 5. Nevertheless, Don Benito had a value of N of 3.077, while Badajoz, which has the lowest N value (1.315) for MAY/JUN of all of the cities, had 203 specimens (Table 5). This result shows that our treatment of N achieved the result that we pursued and that it could be used to compare any city by area. Thus, it was important and significant to the calculations.

Finally, the height above sea level (H) is another of the parameters that form part of AIROT due to its influence on the pollen production [54,55]. This allows comparisons to be made between cities or areas at altitudes over and under 1500 m.a.s.l. (meters above sea level). However, since the five cities studied in this work have all their sources under 1500 m.a.s.l, this parameter has not been relevant to make comparisons between them, but it may be influential for future studies in the cities with sources located in both height categories. With respect to Kriging analysis, a study of five models (stable, circular, spherical, exponential and Gaussian) was made for each map (20 maps) in order to examine the model that best fit. The results were variable, although the exponential model was determined to be optimal the most of times (12 maps), followed by the circular (3 maps), Gaussian (2 maps), stable (2 maps) and finally the spherical model (1 map). This result contrasts with other authors, who found the Gaussian model to be more appropriate [64,65]. By Kriging, the aerobiological urban risk maps were generated. With the creation of these maps in the AIROT and in previous urban planning studies [34,43], we believe that it is necessary to use them as prevention tools to design healthy itineraries [24], maps of tourist places of interest in cities (Figure 1) or gastronomic maps (Figure 2C). With these kinds of maps, mobility through cities will be facilitated for allergic patients. For example, by knowing the places of tourist interest (Figure 1) that are in areas of greater risk, visiting these can be avoided in times of greater aerobiological risk. Furthermore, they could decide where to take precautions, for example with masks. In addition, they help to choose the month in which it would be possible to visit certain places of interest or restaurants (Figure 2C). In the case of Badajoz (Figure 1), if you want to visit the city in winter the most suitable month would be January, since there is a larger area with low levels of risk than in the rest of the cities. This is again justified by the presence of species that are widely used as hedges in our cities such as *C. arizonica* and *P. orientalis* and the absence of pollination of species more used as trees (*C. macrocarpa* or *C. sempervirens*).

In the future, updating risk maps will be needed considering foreseeable changes in the vegetation due to the removal of specimens, the replanting of other specimens and the modifications stemming from the development of some specimens from hedges to bushes or trees and vice versa. Aerobiological samplings can also be established with portable sensors in the different areas of aerobiological risk in cities [66], in order to establish the relationship between AIROT and the pollen concentration of those areas. In this manner the value of this index could also be strengthened. Other interesting possibilities to improve the index would be using LiDAR to model the pollen production within the city [67], or even by using other remote sensing technologies to detect meteorological changes in temperature to increase the accuracy of the risk maps [68]. Finally, further research should be conducted on the pollination of the studied species to know more about the maturity age of the described species.

With the above methodology and the chosen species, reinforcement of the AIROT index has been achieved with the inclusion of pollen production (parameter α) and can be used to make comparisons between species. Moreover, the risk areas were located within the five studied cities for the months in which the pollination of Cupressaceae lasts. New uses and types of risk maps are proposed as informative tools for the population, such as the location of areas of cultural interest and the use in gastronomic culture. In addition, it could be used for the design of new constructions [26] and to advise people in charge of urban planning and green spaces to reduce the concentration of specimens, or use pruning to reduce the emission of pollen. Additionally it could be used, for example, to inform business owners in order to alleviate the allergic symptoms of their clients, avoiding planting species that produce allergenic pollen, such as Cupressaceae.

5. Conclusions

A new parameter, α (pollen production of each species), has been added to the AIROT index. With the inclusion of this parameter, it is possible to use AIROT for estimating the associated risk of exposure to the Cupressaceae pollen from the species studied in this study and also to compare the regular fluctuations in this risk along the year associated to different species within the same pollen type. Creating aerobiological risk maps for the months in which the studied Cupressaceae species pollinate will allow for the population to be informed of the areas where there exists a greater risk of exposure to pollen, thus enabling people to adapt their itineraries to avoid unnecessary exposure to allergens. It was shown that the AIROT index is a useful tool for mapping possible biological risks in cities, even when several species match, due to the addition of the α parameter. The AIROT allows to evaluate the areas where there is a greater aerobiological risk, contemplating each city's characteristics and the physical and the phenological, characteristics of each species. In addition, the creation of risk maps for tourism can be valuable for allergic patients and tourists, but also for urban planning and tourism councillors in order to structure the vegetation and reduce the allergenic potential of certain areas.

Supplementary Materials: The following are available online at www.mdpi.com/2072-4292/12/10/1562/s1, Figure S1: risk maps of Badajoz for each month according to the AIROT index. Figure S2: risk maps of Cáceres for each month according to the AIROT index. Figure S3: risk maps of Don Benito for each month according to the AIROT index. Figure S4: risk maps of Plasencia for each month according to the AIROT index. Figure S5: risk maps of Zafra for each month according to the AIROT index. Figure S6: results for the cross-validation test. Table S1: results for the different functions that were tested in the Kriging analysis according to the RMSE and Spearman's rank coefficient.

Author Contributions: Conceptualization, R.P.C., S.F.R., R.F.T., A.G.G. and J.M.M.M.; methodology, R.P.C., R.T.M., J.F.C. and J.M.M.M.; software, R.P.C., J.F.C. and J.M.M.M.; validation, R.P.C. and J.M.M.M.; formal analysis, R.P.C., S.F.R., R.T.M. and J.M.M.M.; investigation, R.P.C., S.F.R., R.T.M. and J.M.M.M.; resources, R.P.C., S.F.R., R.T.M. and J.M.M.M.; data curation, R.P.C., A.M.C. and J.M.M.M.; writing—original draft preparation, R.P.C., S.F.R., R.T.M., A.G.G. and J.M.M.M.; writing—review and editing, I.S.P., A.M.C. and J.F.C.; visualization, R.P.C., J.M.M.M.; supervision, S.F.R., R.T.M., A.G.G., J.M.M.M.; project administration, S.F.R., J.M.M.M.; funding acquisition, S.F.R., A.G.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was possible by funds from research projects PRIIB16029 and research group said GR18113 financed by the Regional Government, Junta de Extremadura (Spain). Particularly, the Irish Environmental Protection Agency (EPA, programme 2014–2020, Climate, 2017) funded to J.M.M.M during part of the realization of this paper and National Commission of Science and Technology of Mexico (CONACyT) funds to A.M.C.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Hoesly, R.M.; Smith, S.J.; Feng, L.; Klimont, Z.; Janssens-Maenhout, G.; Pitkanen, T.; Seibert, J.J.; Vu, L.; Andres, R.J.; Bolt, R.M.; et al. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geosci. Model Dev.* **2018**, *11*, 369–408, doi:10.5194/gmd-11-369-2018.
2. Chan, C.K.; Yao, X. Air pollution in mega cities in China. *Atmos. Environ.* **2008**, *42*, 1–42, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.003.
3. Duinker, P.N.; Ordez, C.; Steenberg, J.W.N.; Miller, K.H.; Toni, S.A.; Nitoslawski, S.A. Trees in canadian cities: Indispensable life form for urban sustainability. *Sustain. (Switz.)* **2015**, *7*, 7379–7396, doi:10.3390/su7067379.
4. Beckett, K.P.; Freer-Smith, P.H.; Taylor, G. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environ. Pollut.* **1998**, *99*, 347–360, doi:10.1016/S0269-7491(98)00016-5.
5. Maimaitiyiming, M.; Ghulam, A.; Tiyp, T.; Pla, F.; Latorre-Carmona, P.; Halik, T.; Sawut, M.; Caetano, M. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *Isprs J. Photogramm. Remote Sens.* **2014**, *89*, 59–66, doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.12.010.
6. Chiesura, A. The role of urban parks for the sustainable city. *Landsc. Urban Plan.* **2004**, *68*, 129–138, doi:10.1016/j.landurbplan.2003.08.003.
7. Chaphekar, S.B. Botanist in urban environments. *Environ. Int. Soc. Environ. Bot.* **2009**, *15*, 4–6.
8. Mack, R.N.; Simberloff, D.; Lonsdale, W.M.; Evans, H.; Clout, M.; Bazzaz, F.A. Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecol. Appl.* **2000**, *10*, 689–710, doi:BICEGCJ2.0.CO;2.
9. Domm, J.; Drew, R.; Greene, A.; Ripley, E.; Smardon, R.; Tordesillas, J. Recommended urban forest mixtures to optimize selected environmental benefits. *Environ. Int. Soc. Environ. Bot.* **2008**, *14*, 7–10.
10. Pawankar, R. Allergic diseases and asthma: A global public health concern and a call to action. *World Allergy Organ. J.* **2014**, *7*, 12, doi:10.1186/1939-4551-7-12.
11. Bunne, J.; Moberg, H.; Hedman, L.; Andersson, M.; Bjerg, A.; Lundbäck, B.; Rönmark, E. Increase in Allergic Sensitization in Schoolchildren: Two Cohorts Compared 10 Years Apart. *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.* **2017**, *5*, 457–463.e1, doi:10.1016/j.jaip.2016.09.025.
12. Beckett, K.P.; Freer-Smith, P.H.; Taylor, G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboric. J.* **2000a**, *24*, 209–230, doi:10.1080/03071375.2000.9747273.
13. Beckett, K.P.; Freer-Smith, P.H.; Taylor, G. Particulate pollution capture by urban trees: Effect of species and windspeed. *Glob. Chang. Biol.* **2000b**, *6*, 995–1003, doi:10.1046/j.1365-2486.2000.00376.x.
14. Freer-Smith, P.H.; Beckett, K.P.; Taylor, G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environ. Pollut.* **2005**, *133*, 157–167, doi:10.1016/j.envpol.2004.03.031.
15. Charpin, D.; Pichot, C.; Belmonte, J.; Sutra, J.; Zidkova, J.; Chanez, P.; Shahali, Y.; Sénéchal, H.; Poncet, P. Cypress Pollinosis: From Tree to Clinic. *Clin. Rev. Allergy Immunol.* **2019**, *56*, 174–195, doi:10.1007/s12016-017-8602-y.
16. Hidalgo, P.J.; Galán, C.; Domínguez, E. Male phenology of three species of *Cupressus*: Correlation with airborne pollen. *Trees Struct. Funct.* **2003**, *17*, 336–344.
17. Caiaffa, M.F.; Macchia, L.; Strada, S.; Barileto, G.; Scarpelli, F.; Tursi, A. Airborne Cupressaceae pollen in Southern Italy. *Ann. Allergy* **1993**, *71*, 45–50.
18. Shahali, Y.; Pourpak, Z.; Moin, M.; Zare, A.; Majd, A. Impacts of air pollution exposure on the allergenic properties of Arizona cypress pollens. *J. Phys. Conf. Ser.* **2009**, *151*, 012027, doi:10.1088/1742-6596/151/1/012027.
19. Wang, Q.; Morita, J.; Nakamura, S.; Wu, D.; Gong, X.; Suzuki, M.; Miwa, M.; Nakajima, D. Field investigation on modification of Japanese cedar pollen allergen in urban air-polluted area. *World Acad. Sci. Eng. Technol.* **2010**, *70*, 624–629.

20. Shahali, Y.; Poncet, P.; Sénéchal, H. Cupressaceae pollinosis and air pollution. *Rev. Fr. D'allergologie* **2013**, *53*, 468–472, doi:10.1016/j.reval.2013.01.050.
21. Laaidi, K.; Carli, P.-. Detecting emerging risks in environmental health: The example of cypress pollinosis in Burgundy. *Environ. Risques Et Sante* **2002**, *1*, 217–222.
22. Conway, T.M.; Vander Vecht, J. Growing a diverse urban forest: Species selection decisions by practitioners planting and supplying trees. *Landsc. Urban Plan.* **2015**, *138*, 1–10, doi:10.1016/j.landurbplan.2015.01.007.
23. Cariñanos, P.; Casares-Porcel, M.; Quesada-Rubio, J. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landsc. Urban Plan.* **2014**, *123*, 134–144, doi:10.1016/j.landurbplan.2013.12.009.
24. Pecero-Casimiro, R.; Fernández-Rodríguez, S.; Tormo-Molina, R.; Monroy-Colín, A.; Silva-Palacios, I.; Cortés-Pérez, J.P.; Gonzalo-Garijo, Á.; Maya-Manzano, J.M. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees. *Sci. Total Environ.* **2019**, *693*, 133576, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.382.
25. Alcázar, P.; Galán, C.; Torres, C.; Domínguez-Vilches, E. Detection of airborne allergen (Pla a 1) in relation to Platanus pollen in Córdoba, South Spain. *Ann. Agric. Environ. Med.* **2015**, *22*, 96–101, doi:10.5604/12321966.1141376.
26. Fernández-Rodríguez, S.; Cortés-Pérez, J.P.; Muriel, P.P.; Tormo-Molina, R.; Maya-Manzano, J.M. Environmental impact assessment of Pinaceae airborne pollen and green infrastructure using BIM. *Autom. Constr.* **2018**, *96*, 494–507, doi:10.1016/j.autcon.2018.10.011.
27. Thompson, R.S. Building amplification factors for sources near buildings: A wind-tunnel study. *Atmos. Environ. Part A Gen. Top.* **1993**, *27*, 2313–2325, doi:10.1016/0960-1686(93)90400-S.
28. Cariñanos, P.; Alcázar, P.; Galán, C.; Domínguez, E. Privet pollen (*Ligustrum* sp.) as potential cause of pollinosis in the city of Cordoba, south-west Spain. *Allergy: Eur. J. Allergy Clin. Immunol.* **2002**, *57*, 92–97, doi:10.1034/j.1398-9995.2002.1o3261.x.
29. Farzinmoghdam, M.; Mostafavi, N.; Infield, E.H.; Hoque, S. Developing an automated method for the application of lidar in iumat land-use model: Analysis of land-use changes using building-form parameterization, GIS, and artificial neural networks. *J. Green Build.* **2019**, *14*, 1–30, doi:10.3992/1943-4618.14.1.1.
30. Kanja, K.; Karahalil, U.; Çil, B. Modeling stand parameters for Pinus brutia (Ten.) using airborne LiDAR data: A case study in Bergama. *J. Appl. Remote Sens.* **2020**, *14*, 022205, doi:10.1117/1.JRS.14.022205.
31. Ishida, T.; Ando, H. Computer-assisted mapping of paddy-field soils: 1. production of closely spaced data from sparse data relating to soil chemical properties. *Soil Sci. Plant Nutr.* **1994**, *40*, 391–402, doi:10.1080/00380768.1994.10413317.
32. León Ruiz, E.J.; García Mozo, H.; Domínguez Vilches, E.; Galán, C. The use of geostatistics in the study of floral phenology of *Vulpia geniculata* (L.) Link. *Sci. World J.* **2012**, *2012*, 624247, doi:10.1100/2012/624247.
33. Hien, P.D.; Men, N.T.; Tan, P.M.; Hangartner, M. Impact of urban expansion on the air pollution landscape: A case study of Hanoi, Vietnam. *Sci. Total Environ.* **2020**, *702*, 134635, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134635.
34. Maya Manzano, J.M.; Tormo Molina, R.; Fernández Rodríguez, S.; Silva Palacios, I.; Gonzalo Garijo, Á. Distribution of ornamental urban trees and their influence on airborne pollen in the SW of Iberian Peninsula. *Landsc. Urban Plan.* **2017**, *157*, 434–446, doi:10.1016/j.landurbplan.2016.08.011.
35. NSI. Population by Cities. National Institute of Statistics, Madrid, Spain. 2018. Available online: <https://www.ine.es/> (accessed on 21 December 2019).
36. AEMET (2018) Valores climatológicos normales: Badajoz Aeropuerto—Agencia Estatal de Meteorología—AEMET; AEMET: Gobierno de España, Spain, 2019.
37. Charpin, D.; Calleja, M.; Pichot, C.; Penel, V.; Hugues, B.; Poncet, P. Cypress pollen allergy. *Rev. Fr. D'allergologie* **2016**, *56*, 248–250, doi:10.1016/j.reval.2016.01.011.
38. IGN. CORINE Land Cover. Instituto Geográfico Nacional del Gobierno de España. 2019. Available online: <http://www.ign.es/ign/main/index.do> (accessed on 11 November 2019).
39. Gamba, P.; Houshmand, B. Digital surface models and building extraction: A comparison of IFSAR and LIDAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2000**, *38*, 1959–1968, doi:10.1109/36.851777.
40. Bartie, P.; Reitsma, F.; Kingham, S.; Mills, S. Incorporating vegetation into visual exposure modelling in urban environments. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* **2011**, *25*, 851–868, doi:10.1080/13658816.2010.512273.

41. Skjøth, C.A.; Ørby, P.V.; Becker, T.; Geels, C.; Schlfunssen, V.; Sigsgaard, T.; Bønløkke, J.H.; Sommer, J.; Søgaard, P.; Hertel, O. Identifying urban sources as cause of elevated grass pollen concentrations using GIS and remote sensing. *Biogeosciences* **2013**, *10*, 541–554, doi:10.5194/bg-10-541-2013.
42. Talhouk, S.N.; Fabian, M.; Dagher, R. *Landscape Plant Database. Department of Landscape Design & Ecosystem Management*; American University of Beirut: Beirut, Lebanon, 2015; Volume 2019.
43. Maya-Manzano, J.M.; Fernández-Rodríguez, S.; Monroy-Colín, A.; Silva-Palacios, I.; Tormo-Molina, R.; Gonzalo-Garijo, Á. Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban For. Urban Green.* **2017**, *27*, 352–362, doi:10.1016/j.ufug.2017.09.009.
44. Hidalgo, P.J.; Galán, C.; Domínguez, E. Pollen production of the genus cupressus. *Grana* **1999**, *38*, 296–300, doi:10.1080/001731300750044519.
45. Charpin, D.; Pichot, C.; Calleja, M. Trimming cypress tree hedges and its effects on subsequent pollination. *Ann. Allergy Asthma Immunol.* **2011**, *106*, 259–260, doi:10.1016/j.anai.2010.12.007.
46. Rezanejad, F. Air pollution effects on structure, proteins and flavonoids in pollen grains of Thuja orientalis L. (Cupressaceae). *Grana* **2009**, *48*, 205–213, doi:10.1080/00173130902949417.
47. Damialis, A.; Fotiou, C.; Halley, J.M.; Vokou, D. Effects of environmental factors on pollen production in anemophilous woody species. *Trees—Struct. Funct.* **2011**, *25*, 253–264, doi:10.1007/s00468-010-0502-1.
48. Verdú, M. Age at maturity and diversification in woody angiosperms. *Evolution* **2002**, *56*, 1352–1361, doi:10.1111/j.0014-3820.2002.tb01449.x.
49. Huang, L.; Koubek, T.; Weiser, M.; Herben, T. Environmental drivers and phylogenetic constraints of growth phenologies across a large set of herbaceous species. *J. Ecol.* **2018**, *106*, 1621–1633, doi:10.1111/1365-2745.12927.
50. Freeman, K.W.; Girma, K.; Arnall, D.B.; Mullen, R.W.; Martin, K.L.; Teal, R.K.; Raun, W.R. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. *Agron. J.* **2007**, *99*, 530–536, doi:10.2134/agronj2006.0135.
51. Schirrmann, M.; Hamdorf, A.; Garz, A.; Ustyuzhanin, A.; Dammer, K.-. Estimating wheat biomass by combining image clustering with crop height. *Comput. Electron. Agric.* **2016**, *121*, 374–384, doi:10.1016/j.compag.2016.01.007.
52. Hu, P.; Chapman, S.C.; Wang, X.; Potgieter, A.; Duan, T.; Jordan, D.; Guo, Y.; Zheng, B. Estimation of plant height using a high throughput phenotyping platform based on unmanned aerial vehicle and self-calibration: Example for sorghum breeding. *Eur. J. Agron.* **2018**, *95*, 24–32, doi:10.1016/j.eja.2018.02.004.
53. Han, X.; Thomasson, J.A.; Bagnall, G.C.; Pugh, N.A.; Horne, D.W.; Rooney, W.L.; Jung, J.; Chang, A.; Malambo, L.; Popescu, S.C.; et al. Measurement and Calibration of Plant-Height from Fixed-Wing UAV Images. *Sens. (Basel Switz.)* **2018**, *18*, 92, doi:10.3390/s18124092.
54. Scheifinger, H.; Menzel, A.; Koch, E.; Peter, Ch. Ahas, R. Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological observations in central Europe. *Int. J. Climatol.* **2002**, *22*, 1739–1755.
55. Sharma, C.M.; Khanduri, V.P.; Ghildiyal, S.K. Reproductive ecology of male and female strobili and mating system in two different populations of Pinus roxburghii. *Sci. World J.* **2012**, *2012*, 271389, <https://doi.org/10.1100/2012/271389>.
56. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013. Available online: <http://www.R-project.org> (accessed on 16 October 2019).
57. Baxi, S.N.; Phipatanakul, W. The role of allergen exposure and avoidance in asthma. *Adolesc. Med. State Art Rev.* **2010**, *21*, 57–71.
58. El Periódico Extremadura (2019) Atrio, Entre Los Diez Mejores Restaurantes de Alta Cocina. Available online: https://www.elperiodicoextremadura.com/noticias/caceres/atrio-diez-mejores-restaurantes-alta-cocina_1194675.html (accessed on 28 August 2019).
59. Stephenson, P.L.; Taylor, M.V. Traveler's Health Information on the Internet. *J. Consum. Health Internet* **2013**, *17*, 410–418, doi:10.1080/15398285.2013.839000.
60. Charpin, D.; Calleja, M.; Lahoz, C.; Pichot, C.; Waisel, Y. Allergy to cypress pollen. *Allergy Eur. J. Allergy Clin. Immunol.* **2005**, *60*, 293–301, doi:10.1111/j.1398-9995.2005.00731.x.
61. Fernández-Rodríguez, S.; Skjøth, C.A.; Tormo-Molina, R.; Brandao, R.; Caeiro, E.; Silva-Palacios, I.; Gonzalo-Garijo, Á.; Smith, M. Identification of potential sources of airborne Olea pollen in the Southwest Iberian Peninsula. *Int. J. Biometeorol.* **2014**, *58*, 337–348, doi:10.1007/s00484-012-0629-4.

62. Salmond, J.A.; Tadaki, M.; Vardoulakis, S.; Arbuthnott, K.; Coutts, A.; Demuzere, M.; Dirks, K.N.; Heaviside, C.; Lim, S.; MacIntyre, H.; et al. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environ. Health: A Glob. Access Sci. Source* **2016**, *15*, S36, doi:10.1186/s12940-016-0103-6.
63. Nowak, M.; Szymanska, A.; Grewling, L. Allergic risk zones of plane tree pollen (*Platanus* sp.) in Poznan. *Postepy Dermatol. i Alergol.* **2012**, *29*, 156–160.
64. Manzione, R.L.; Castrignanò, A. A geostatistical approach for multi-source data fusion to predict water table depth. *Sci. Total Environ.* **2019**, *696*, 133763, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133763.
65. Oteros, J.; Bergmann, K.-.; Menzel, A.; Damialis, A.; Traidl-Hoffmann, C.; Schmidt-Weber, C.B.; Buters, J. Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmos. Environ.* **2019**, *199*, 435–442, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.11.045.
66. Werchan, B.; Werchan, M.; Mücke HG.; Bergmann, K.C. Spatial distribution of pollen-induced symptoms within a large metropolitan area-Berlin, Germany. *Aerobiologia* **2018**, *34*, 539–556.
67. Bogawski, P.; Grewling, Ł.; Dziób, K.; Sobieraj, K.; Dalc, M.; Dylawerska, B.; Pupkowski, D.; Nalej, A.; Nowak, M.; Szymańska, A.; Kostecki, Ł.; Nowak, M.M.; et al. Lidar-derived tree crown parameters: Are they new variables explaining local birch (*Betula* sp.) pollen concentrations? *Forests* **2019a**, *10*, 1154, doi:10.3390/F10121154.
68. Bogawski, P.; Grewling, Ł.; Jackowiak, B. Predicting the onset of *Betula pendula* flowering in Poznań (Poland) using remote sensing thermal data. *Sci. Total Environ.* **2019b**, *658*, 1485–1499.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

6

DISCUSIÓN GENERAL



6. Discusión general

Las diferentes especies que componen la flora de una zona presentan determinados caracteres endógenos como la época de floración y/o el tipo de polinización que afectan a la emisión de polen por parte de la fuente. Además, se agrupan en comunidades vegetales dando lugar a la vegetación de la zona, la cual es un factor importante que influye en el registro polínico (Corchero et al., 2006). En Extremadura, la flora está enriquecida con taxones alóctonos que se encuentran más o menos integrados en el territorio y que proceden de cultivos agrícolas u ornamentales escapados y naturalizados y malas hierbas (Devesa, 1995). La agricultura y la ganadería en la región extremeña son actividades económicas de elevado potencial donde los cultivos de olivares y los de cereales ocupan una importante extensión (Tormo-Molina, 2000), siendo la ocupación, en el año 2016, del olivar de 214494 Ha y del cultivo de herbáceas de 641751 Ha (INE, 2019b). Además, en ocasiones, estas explotaciones agrícolas y ganaderas se encuentran compartiendo espacio con paisajes naturales dominados por encinas (*Quercus rotundifolia*), alcornoques (*Q. suber*), robles pirenaicos (*Q. pyrenaica*) y pastizales (Charco et al., 2008). Esta predominancia de cierto tipo de vegetación influye mucho en las concentraciones de polen recogidas por los captadores en Extremadura, estableciéndose el tipo polínico perteneciente a *Quercus* como el más abundante de la región, seguido de *Olea* y *Poaceae* (Capítulo I).

El interés por las plantas ornamentales procede de muchos siglos atrás, aunque en la actualidad ha crecido notablemente sobre todo por parte de las autoridades locales para potenciar los espacios verdes. Esto en parte se debe a cuestiones estéticas dentro de las ciudades donde la ubicación de los especímenes ornamentales está ligada principalmente como elementos decorativos de paseos, avenidas, parques y ajardinamientos públicos (Devesa, 1995), como puede comprobarse en los Capítulos II y III. No obstante, el auge de los espacios verdes urbanos en partes también se debe a que producen beneficios en la salud mental y física (OMS, 2016b) gracias a su papel para la mitigación de contaminantes atmosféricos (Beckett et al., 1998) o la reducción de las temperaturas en las zonas urbanas (Maimaitiyiming et al., 2014) entre otras funciones. La flora ornamental de cualquier región está integrada a menudo por elementos procedentes de zonas muy diversas del Planeta, capaces de soportar las nuevas condiciones a las que son sometidas. La vegetación ornamental utilizada en la región extremeña, aunque variada, apenas cuenta con elementos autóctonos más allá de la encina (*Quercus rotundifolia*), la adelfa (*Nerium oleander*) y el palmito (*Chamaerops humilis*), principalmente. La gran mayoría de las plantas ornamentales de Extremadura proceden de otros países entre las que destacan especies como *Platanus hispanica*, por su función de dar sombra, y *Thuja occidentalis* por su facilidad para formar setos, entre otros (Devesa, 1995). No obstante, ciertas especies de la familia Cupressaceae son muy utilizadas como ornamentos en las

ciudades de estudio (Capítulo III), al igual que del género *Platanus* sp. siendo elevado el número de ejemplares geolocalizados de ambos (Tabla 1).

Según Corchero et al. (2006) y Rogers (1997) entre otros, la mayoría de los tipos polínicos recogidos en la atmósfera de un lugar, son el reflejo de la vegetación circundante al captador incluyendo tanto la vegetación natural como la ornamental y su número de ejemplares. En este sentido, el elevado número de ejemplares de *Platanus* y Cupressaceae geolocalizados en los Capítulos II y III respectivamente, justifica las elevadas concentraciones de polen que pueden observarse en el Capítulo I. Ambos tipos polínicos, de procedencia ornamentales, se sitúan en cuarto (Cupressaceae) y quinto (*Platanus*) lugar en la clasificación de los tipos polínicos más abundantes de las ciudades extremeñas.

Por lo tanto, aunque los espacios verdes urbanos son cada vez más importantes para la sostenibilidad y la habitabilidad dentro de las ciudades (Bush, 2020), los granos de polen liberados por las plantas en su función de reproducción sexual durante el proceso de polinización (Linskens et al., 2000) causan alergias en los habitantes de las ciudades (Cariñanos et al., 2016). Si bien, como ya vimos anteriormente, el polen podría pertenecer a varios ámbitos legislativos, aún no hay normas que regulen las concentraciones de los mismos en el aire. Debido a esta falta de regulación, se hace indispensable el desarrollo de herramientas de información aerobiológica que permitan dar a conocer los riesgos a las personas alérgicas, así como al personal sanitario para la planificación y tratamiento preventivos. También las pautas a seguir para los profesionales del sector de la planificación de infraestructuras verdes.

Las herramientas de información aerobiológica son elementos elaborados con el objetivo de hacer más sencilla la divulgación de la información obtenida sobre datos aerobiológicos. En este sentido se lleva trabajando desde hace tiempo en Aerobiología, desarrollando por ejemplo calendarios aerobiológicos (polínicos y fúngicos), como los que se integran en el Capítulo I para las ciudades extremeñas. Más recientemente y aprovechando el auge de las nuevas tecnologías, se han desarrollado herramientas de información aerobiológica como el “indicador de polen” de Múnich (Buters et al., 2018b), o los sistemas de información POLLAR (Bousquet et al., 2018), R-PAS (Csépe et al., 2019) o Pollin'air (Grégori et al., 2019) e incluso el uso de mapas proporcionando información para estudiar el impacto en la salud y las implicaciones ecológicas (Oteros et al., 2017).

Crear herramientas de información aerobiológica es lo que persigue la presente Tesis Doctoral. Primero, creando calendarios polínicos y elaborando mapas a partir de gradientes regionales que proporcionen información sobre las principales fechas del Período de Polinización Principal (PPP, en el Capítulo I apareciendo como MPS de “Main Pollen Season”) y concentraciones de ciertos tipos polínicos (Capítulo I). Segundo, desarrollando un índice que

calcule el riesgo de exposición al polen (no sus concentraciones) en cada punto de las ciudades y elaborando mapas con dicha información para *Platanus* (Capítulo II) y Cupressaceae (Capítulo III).

Los mapas de gradientes geográficos regionales muestran la geolocalización de calendarios de polen (Lo et al., 2019) y proporcionan información visual de los principales parámetros de PPP, como la fecha de inicio, la fecha pico, la fecha de finalización, la duración de el período de polinización y su Integral Estacional de Polen (SPIIn) (Capítulo I), por lo que podrían ser usados como herramientas de información aerobiológica. Los calendarios de polen dependen de la ubicación de las fuentes debido a la naturaleza regional de la ecología vegetal y el clima, por lo que es posible extraer esta información y saber cómo la latitud afecta a las concentraciones de polen (Lo et al., 2019) (Capítulo I). Los tipos polínicos elegidos para la elaboración estos mapas han sido Cupressaceae, *Olea*, *Platanus*, Poaceae y *Quercus* por su importancia en el espectro polínico de Extremadura (Capítulo I). En estos mapas se pueden observar por ejemplo que el comienzo de la temporada de polen para *Quercus* en Extremadura se produce antes en el sur, la fecha en la que se establece el pico máximo de polen también se llega antes en el sur. Lo mismo ocurre en España si tenemos en cuenta por ejemplo las ciudades de Huelva donde su pico se alcanza a finales de marzo, Córdoba que se alcanza el 2 de abril (Martínez-Bracero et al., 2015), Cáceres del 10 de abril (Capítulo I) y Salamanca el 27 de mayo (Rodríguez-de la Cruz et al., 2010). Tomando otro ejemplo, en este caso *Olea*, la polinización en Extremadura comienza antes en ciudades más al sur de la región. Estos mismos resultados sobre la influencia de la latitud para *Olea* están de acuerdo con los obtenidos por Aguilera et al. (2015).

Los calendarios polínicos se definen como una representación gráfica que muestra la dinámica anual de los principales tipos de polen (Elvira-Rendueles et al., 2019). En Extremadura de todos los tipos de polen recolectados, que superan los 60, menos de la mitad alcanza un APIIn (Integral anual de polen) significativo, que algunos autores lo llaman MPT (tipos principales de polen) y lo establecen ≥ 100 granos de polen*día/m³ (Elvira-Rendueles et al., 2019) y que han sido los tipos de polen incluidos en los calendarios de la región de Extremadura (Capítulo I). Por ciudades, Cáceres ha sido la que mayor número de tipos polínicos superan ese umbral (19), seguida de BA y DB (17), PL (15) y finalmente ZA (12). Estos valores se encuentran próximos a los registrados en otras ciudades españolas como Salamanca (12) (Rodríguez-de la Cruz et al., 2010), Sevilla (13), Málaga (12) (Martínez-Bracero et al., 2015), Cartagena (14), Lorca (15), Murcia (15) (Elvira-Rendueles et al., 2019); y algo superior a los obtenidos en Cuenca (10) (Pérez-Badía et al., 2011) y Córdoba (10) (Martínez-Bracero et al., 2015).

Como se mencionó anteriormente, los tipos polínicos más abundantes en la región de Extremadura se ven influenciados por la vegetación y, por tanto, por los usos del suelo, por su su

modificación o por la introducción de especies ornamentales en jardines y parques (Cristofori et al., 2010; Singh et al., 2017), de ahí la importancia del estudio de las fuentes y sus riesgos en los Capítulos II y III. Además, algunos tipos polínicos, como por ejemplo *Quercus*, también se ve influenciado por las grandes cantidades de polen liberadas por algunos de sus taxones (Tormo-Molina et al., 1996). Los resultados obtenidos en la región extremeña son similares a los que se obtienen en Salamanca, donde el más abundante es *Quercus* seguido de Poaceae (Rodríguez-de la Cruz et al., 2010) y similar, aunque se obtienen resultados inversos, en Huelva donde el más abundante es Poaceae seguido de *Quercus* (Martínez-Bracero et al., 2015). Estas similitudes en los resultados de las provincias limítrofes a la región podrían explicarse debido a usos del suelo y clima similares. Los usos del suelo, en este caso la diferencia en la cobertura del mismo, podría explicar también por qué a pesar de tener la misma temperatura media, *Quercus* no es tan abundante en DB como lo es en otras ciudades, como BA y CC. La misma explicación podría servir para *Olea* que es otro tipo de polen importante en la región de Extremadura, siendo el segundo taxón más abundante en ZA y DB. El olivar en Zafra es uno de los principales usos del suelo, siendo además la ciudad con mayor APIIn de las estudiadas.

Las concentraciones polínicas dependen de la vegetación y los sustratos disponibles (Gonzalo-Garijo et al., 2006) y estos a su vez de las condiciones meteorológicas, y los cambios producidos en las mismas, entre las que se encuentran la temperatura y las precipitaciones (Ehrlén et al., 2020) y por factores ambientales que permiten su formación y liberación, transporte y deposición (Tormo-Molina et al., 2013). Por ejemplo, el polen de *Quercus* puede encontrarse en la región de Extremadura durante casi todo el año en la ciudad de Badajoz, sin embargo, en el resto de ciudades no suele aparecer en invierno. Esto podría deberse a la diferencia de precipitaciones anuales entre las ciudades, ya que Badajoz es la ciudad con menor precipitación acumulada, por lo que los granos de polen podrían permanecer en el aire durante un período más prolongado. Badajoz también posee la temperatura media más alta (17 °C) y presenta inviernos suaves que podrían facilitar la floración temprana (Capítulo I). Las temperaturas, los usos del suelo y la altitud a la que se encuentran las fuentes (Sharma et al., 2012) podrían ser la explicación de las diferencias que se producen en la duración del PPP para Poaceae en Extremadura, produciéndose en Zafra, el sitio con la cota de altitud más alta, el periodo más corto (63 días) y en DB el más largo (118 días) (Capítulo I). En Don Benito, la temperatura media registrada a lo largo del año es la más alta de las ciudades estudiadas (17,1°C), mientras que Zafra muestra la temperatura más baja (15,8°C). Además, Don Benito, junto con Badajoz, se encuentra en llanuras más bajas que las demás ciudades y el uso del suelo de sus alrededores son pastizales, sustentando un número considerable de especies que extienden el PPP por un período más largo.

Todas estas variables mencionadas están influenciadas por la latitud, asociadas a indicadores como la temperatura y las horas de luz (Lo et al., 2019). En Extremadura, la latitud puede ser importante para determinar los periodos de polinización de algunos tipos de polen presentes en paisajes naturales, como *Quercus* y *Olea*. La longitud no pareció influir tan claramente en los resultados obtenidos (Capítulo I), quizá por no ser una región excesivamente “ancha” en cuanto a superficie, por lo que el fotoperiodo sería el mismo en todos los puntos. A pesar de esta menor influencia, si que se aprecia que *Olea*, *Quercus* y Poaceae (los tres que no dependen de poda o diferencias de manejo como Cupressaceae o *Platanus*, sino que son cultivos o vegetación natural) empezaron primero sus PPP en el lado este de Extremadura. Esto podría estar provocado por el transporte a media o larga distancia desde otros sitios como Andalucía (Fernández-Rodríguez et al., 2020; Monroy-Colín et al., 2020).

Cupressaceae también fue identificado como un tipo polínico importante en Extremadura en el presente estudio, especialmente en las ciudades de BA, DB y ZA donde se recogen las concentraciones más elevadas. No obstante, las cinco ciudades presentaron valores altos en el período invernal. En Toledo, Huelva, Sevilla y Évora se observan patrones similares en cuanto a las fechas en las que ocurren los valores más altos (Camacho et al., 2017; Martínez-Bracero et al., 2015; Pérez-Badia et al., 2010). DB registró las concentraciones más altas para *Platanus*, donde los niveles superaron hasta en 7 veces las de otras ciudades de Extremadura. Además, en el calendario polínico de Badajoz también se alcanza el nivel máximo establecido y mostró niveles cercanos a esos valores máximos en CC. Las altas concentraciones de polen de *Platanus* en el aire duraron entorno a 2 o 3 semanas en la mayoría de las ciudades, excepto en DB, donde la duración fue de hasta 6 semanas.

Las diferencias entre las ciudades en cuanto a la presencia de diferentes tipos de polen en el aire y las concentraciones y épocas del año en las que se producen dependen de varios factores. En algunos casos, estas diferencias se deben a la amplia variedad de especies incluidas dentro de un tipo de polen, como es el caso de Cupressaceae y Poaceae (Boi et al., 2013; Galán et al., 1989; Wang et al., 2013). También pueden deberse a la proximidad de las fuentes a los granos de polen de fuentes separadas a media o larga distancia y al número de especímenes que pueden ubicarse cerca de los captadores. Por ejemplo, Cupressaceae es un tipo de polen para el cual las fuentes locales tienen una influencia importante, ya que esta familia se usa ampliamente en áreas urbanas como plantas ornamentales en jardines públicos o privados (Caiaffa et al., 1993). Los árboles ornamentales pertenecientes a *Platanus* también se utilizan ampliamente en parques y jardines, por lo que el género está asociado con áreas urbanas (Alcázar et al., 2011). Fue especialmente relevante en DB, donde las concentraciones de *Platanus* en el aire estuvieron sobrerrepresentadas debido al

número de individuos maduros ubicados cerca del captador, mostrando el segundo SPI_n más alto en esta ciudad. Además, las concentraciones de polen producido por fuentes ornamentales como Cupressaceae y *Platanus* también varían debido a otros factores relacionados con el manejo, como riego, tratamientos de enfermedades y plagas o poda (Maya-Manzano et al., 2017b; 2017c), por lo que las diferencias latitudinales que pueden apreciarse en otros tipos polínicos en este caso están atenuadas o eliminadas por estas influencias.

Tampoco podemos descartar cambios a nivel climático afectando a la fenología de las fuentes polínicas y a su distribución. En los últimos años parece demostrarse que existen cambios tanto en la floración en primavera, que se ha adelantado, como en la floración de otoño, que ha sido retrasada en comparación con la década de 1960 (Huynen et al., 2003). En estudios más recientes, comprendidos desde 1963 hasta 2014, se confirma esta tendencia que ya se intuía años antes, afirmando que la primera fecha de floración de la mayoría de las especies de plantas se adelanta en respuesta del aumento de temperatura en las últimas décadas (Wang et al., 2019). Además, existen también tendencias al alza en las concentraciones de polen que podría ser debido, entre otras causas, al aumento de CO₂ antropogénico (Ziello et al., 2012) y al aumento de las temperaturas (Recio et al., 2018). Resultados de algunos estudios como los de Galán et al. (2005) y García-Mozo et al. (2014) muestran indicios de una tendencia ascendente en la producción de polen de *Olea europaea*. Esto mismo ocurre con *Quercus* donde Recio et al. (2018) detectaron picos máximos de polen de *Quercus* en Málaga cada cuatro años aproximadamente, coincidiendo con periodos de sequía. Además, la intensidad anual de la polinización anemófila de *Quercus* se asoció significativamente con las condiciones meteorológicas de cada primavera, concluyendo que la tendencia a que aumente la temperatura y la aridez atmosférica es probablemente la causa de que la tendencia de la producción polínica de *Quercus* aumente en el Mediterráneo occidental. Esta misma relación de la concentración polínica con la temperatura puede ser observada en Extremadura para todo el espectro de tipos polínicos, donde se muestra que en las ciudades con mayor temperatura media (Badajoz y Don Benito) son las que tienen las mayores concentraciones polínicas medias (g/m³) de las cinco ciudades estudiadas (Capítulo I). Es justo en estos cambios de tendencias donde más esfuerzo debe hacerse desde la comunidad científica, ya que podrían ser claros indicadores de la existencia del cambio climático que está afectando al desarrollo de las plantas.

Estos mapas de gradientes regionales, junto con los mapas de riesgos aerobiológicos de gradientes locales (Capítulos II y III) y calendarios de polen (Capítulo I), permiten visualizar y comprender los riesgos, la distribución y la concentración aerobiológica en ciertos lugares, ayudando a los pacientes alérgicos a tratar su enfermedad y a los médicos para prevenir y controlar

las alergias y desarrollar pruebas de diagnóstico (Katotomichelakis et al., 2015) pudiendo ser herramientas de información aerobiológica de gran valor para las personas.

En Aerobiología son varios los índices utilizados. Algunos tienen relación con la teledetección, y se usan con el propósito de hacer pronósticos sobre las fechas de polinización de algunos tipos polínicos como por ejemplo Poaceae a partir del índice EVI (Enhanced Vegetation Index, Devadas et al., 2018) o *Quercus* a partir del índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, González-Naharro et al., 2019). Otros son elaborados específicamente para estimar y dar información sobre el potencial de alergenicidad de una zona verde (Cariñanos et al., 2014) con el cálculo del índice I_{UGZA} (Urban Green Zone Allergenicity Index) o el riesgo aerobiológico que presentan los ejemplares dentro de las zonas urbanas (Pecero-Casimiro et al., 2019; 2020a) (Capítulos II y III) a partir del índice AIROT (Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees) y su representación mediante gradientes locales. Estos índices se basan en las fuentes emisoras de polen, la vegetación urbana, utilizando la ubicación y características biológicas de las mismas para tratar de proporcionar información que pueda ser utilizada por las personas. En el caso del índice I_{UGZA} utiliza la superficie de los ejemplares, la altura, la duración de su polinización y el potencial alergénico entre otras (Cariñanos et al., 2014). Por su parte, el índice AIROT utiliza características biológicas de las plantas como puede ser la madurez de los ejemplares (Capítulo II), la fenología y producción polínica (Capítulo III), además de su densidad, pero también las características urbanas como son la orografía de la propia ciudad, altitud de la ciudad sobre el nivel del mar, amplitud de las calles y altura de los edificios. Estas características urbanas no están presente en I_{UGZA} siendo muy importantes por ejemplo el ancho de las calles y la altura de los edificios, recogido en el índice AIROT en el parámetro Sh, en dificultar la dispersión de los granos de polen al actuar como barrera física (Cariñanos et al., 2002) y que podrían explicar las diferencias de concentraciones de polen encontradas a nivel de calle por autores como De Weger et al. (2020).

El parámetro PD (Potential Dispersability) del índice AIROT es considerado como un indicador teórico del potencial de dispersión y transporte del polen e intenta mostrar los lugares a donde los granos de polen pueden moverse a partir de sus fuentes ornamentales, teniendo en cuenta las características de las fuentes y de la ciudad (la amplitud de las calles, la altura de los edificios y la orografía del terreno). Este parámetro debe calcularse para cada ciudad y para cada especie y mes si se tienen en cuenta varias especies como ocurre en el Capítulo III, ya que cada especie tiene un tamaño de maduración y un espacio de tiempo para la polinización. Para obtener el PD es fundamental hacer un análisis de visibilidad que considere los posibles cambios en la dispersión del polen causados por el aire y que es debido a corrientes que se producen entre las calles y al efecto barrera producido por los edificios. Este análisis de visibilidad evalúa si hay algunos

puntos que están más expuestos que otros, utiliza los modelos digitales de elevaciones (MDE) y de superficie (MDS) obtenidos a partir de puntos LiDAR cuya tecnología ya ha sido usada en Aerobiología para modelar la producción de polen dentro de la ciudad (Bogawski et al., 2019a) y para crear un modelo de distribución de hábitat que fue utilizado para predecir la presencia de *Ambrosia* (Katz et al., 2019). El modelado realizado con LiDAR ofrece la oportunidad de considerar las características geográficas involucradas en la dispersión de los granos de polen (Pecero-Casimiro et al., 2019) (Capítulo II).

La altitud puede producir cambios en las series temporales fenológicas, cambios inducidos por condiciones micrometeorológicas en zonas montañosas (20-40 días cada 1000m de elevación) (Scheifinger et al., 2002). Por este motivo es importante la inclusión del parámetro H en el índice AIROT. No obstante, este no influye en las ciudades de estudio debido a los bajos desniveles que existen siendo las diferencias de altitud entre la cota más alta y la más baja de las zonas urbanas de cada ciudad (en metros): 66 en Badajoz, 137 en Cáceres, 40 en Don Benito, 128 en Plasencia y 128 en Zafra. Sin embargo, puede influir en futuros estudios en ciudades con fuentes ubicadas en ambas categorías de altura (más y menos de 1500 metros, siendo este el límite establecido para el cambio de categoría, obviamente no nos referimos a cambios de 1500 metros de altitud dentro de una ciudad). Otros autores también usaron la altitud como covariable en distintos estudios de interpolación de concentraciones polínicas (Oteros et al., 2019a; Picornell et al., 2019). Los valores mínimos de AIROT se registrarán en calles estrechas, sin presencia de ejemplares de *Platanus* (Capítulo II) ni Cupressaceae (Capítulo III) y sin exposición directa a ninguno de ellos, pero sin considerar este valor nulo en ninguna de las calles porque los autores consideran que un valor nulo puede ser solo teórico y la presencia de polen puede ser debido a una dispersión desde otras calles provocada por el viento, por ejemplo. Sin embargo, ni el viento ni otras condiciones meteorológicas se han considerado directamente porque el objetivo es localizar las áreas donde existe riesgo de exposición al polen debido a la proximidad de las fuentes y las características de la ciudad, independientemente de las diferentes condiciones meteorológicas variables. No obstante, está claro que la dirección del viento influye en la dispersión del polen de un lugar a otro, maximizando y minimizando riesgos, como ya se ha considerado en estudios previos sobre las mismas ciudades (Maya-Manzano et al., 2017c). En cualquier caso, los estudios están limitados a la disponibilidad de datos disponibles, y en el caso de datos meteorológicos, las ciudades extremeñas carecen de una red densa de estaciones meteorológicas que permitan establecer gradientes en ellas. Quizá en futuros trabajos pueda introducirse en este índice variables como la temperatura usando teledetección o modelos geoestadísticos (Bogawski et al., 2019b; Kumar et al., 2016).

Otro parámetro importante es la densidad de ejemplares (N) que hay en una determinada calle o zona y que determina el número de ejemplares que hay por superficie (ha), de tal manera que N viene expresado por n° ejemplares/ha. Además, la madurez (M) de los especímenes también es una característica muy importante porque influye directamente en la concentración de polen producido. Hay autores que han encontrado una relación positiva entre producción de polen por árboles y el diámetro de la copa del árbol (Tormo-Molina et al., 1996) o diámetro del tronco (Maya-Manzano et al., 2017c), además de la altura para predecir el crecimiento y la maduración de las plantas herbáceas (Huang et al., 2018). En el Capítulo II se utilizó el diámetro del tronco para estimar la madurez de los individuos de *Platanus* como en trabajos previos (Maya-Manzano et al., 2017b), mientras que en el Capítulo III se han utilizado las alturas de los ejemplares de Cupressaceae tomando de referencia las medidas de Talhouk et al. (2015). Esta diferencia entre ambos capítulos se debe principalmente a la falta de bibliografía previa que utilicen la misma forma de determinación de la maduración de ambos taxones y a la vez para poner en práctica diferentes metodologías con el fin de identificar la de mayor facilidad de uso. Ambos parámetros (N y M) influyen directamente en las concentraciones polínicas que hay en las ciudades y, por tanto, en los calendarios polínicos de las mismas (Capítulo I).

La elección de los taxones de *Platanus* (Capítulo II) y Cupressaceae (Capítulo III) para la creación del índice AIROT se debe a que son taxones ornamentales que están considerados entre los más alergénicos (Fernández-González et al., 2013; Hidalgo et al., 2003) y se encuentran dentro de los más abundantes y de los de mayor importancia polínica y alergénica en las cinco ciudades estudiadas (Pecero-Casimiro et al., 2020b) (Capítulo I). En primer lugar, se eligió *Platanus* debido a su elevada alergenicidad, ya que es ampliamente utilizado en entornos urbanos mediterráneos (Maya-Manzano et al., 2017b) y a su limitada capacidad de dispersión (Bricchi et al., 2000). Además, es un género que presenta una polinización en un tiempo específico de corta duración (y de manera explosiva) (Alcázar et al., 2015). Sin embargo, en el Capítulo III se quería poner a prueba el índice AIROT con un taxón con un comportamiento diferente. Se eligieron algunas especies (las más abundantes en las ciudades estudiadas) de la familia Cupressaceae (*C. sempervirens*, *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *Cupressocyparis leylandii* y *Platyclusus orientalis*) que presentan períodos de polinización mucho más amplio que *Platanus*, abarcando desde octubre hasta abril y mayo según Charpin et al., (2019) e incluso hasta junio para *C. Leylandii* (Pecero-Casimiro et al., 2020a) (Capítulo III). También provoca síntomas alérgicos durante más intervalo de tiempo debido a que el polen recién liberado se suma a las concentraciones ya existentes en el aire (Cariñanos et al., 2014). Además, el tamaño y el uso dado a cada ejemplar no son los mismos para estas especies, lo que produce variaciones en la producción de polen (Hidalgo et al., 1999; Pecero-Casimiro et al., 2020a).

Estas diferencias entre ambos taxones, sobretodo las que tienen que ver con la producción polínica, son las que dieron lugar a la inclusión del parámetro α en el índice AIROT en el Capítulo III y que no se encontraba en el Capítulo II. Este parámetro ahora permite al índice AIROT estudiar especies y ejemplares de la misma especie que tienen diferente producción polínica debido a la diferencia del tamaño de la planta, a los usos y a la poda. Esta producción de polen (α) no se ha incluido en el índice I_{UGZA}, sin embargo, tanto la fenología como la producción de polen son factores muy importantes por su influencia sobre la alergenicidad (Cariñanos et al., 2014) y sobre el riesgo aerobiológico determinado por AIROT.

En la localización y ubicación de los ejemplares de *Platanus* (Capítulo II) y de Cupressaceae (Capítulo III) y en la ubicación de los captadores polínicos para el desarrollo de gradientes regionales y el estudio de las principales fechas de polinización (Capítulo I), los Sistemas de Información Geográficos han jugado un papel importante. Son numerosas las fuentes de diferentes tipos polínicos que han sido localizadas para el desarrollo de diversos estudios. Por ejemplo, para estimar predicciones en *Quercus* (Fernández-Rodríguez et al., 2016b; González-Naharro et al., 2019; Oteros et al., 2017), *Olea* (Fernández-Rodríguez et al., 2016a) y Poaceae (Fernández-Rodríguez et al., 2016b). También, para identificar condiciones favorables para el transporte atmosférico de polen procedentes de diversas fuentes como *Quercus* (Maya-Manzano et al., 2016b) y *Betula* (Bogawski et al., 2019c). Para estimar las variables fenológicas relacionadas con la fase de floración y, por lo tanto, la liberación de polen (Khwarahm et al., 2017), así como para realizar inventarios de fuentes de polen de *Ambrosia* en Austria (Karrer et al., 2015), Italia (Bonini et al., 2018) y Serbia (Lugonja et al., 2019).

La geolocalización de las fuentes productoras de polen como *Platanus* (Capítulo II) y Cupressaceae (Capítulo III), y de los captadores de muestreo, teniendo en cuenta el posible riesgo aerobiológico que pueden presentar esas fuentes y las concentraciones polínicas recogidas en cada captador permite realizar mapas de gradientes locales (Capítulos II y III) y regionales (Capítulo I) que proporcionan información valiosa para las personas. Esta misma finalidad, la de proporcionar información, persiguen otros trabajos basados en la representación de gradientes concretos en edificios dentro de las ciudades usando tecnología digital como BIM (Building Information Modeling) (Fernández-Rodríguez et al., 2018b). Este último representa por colores la incidencia que puede tener un edificio en la dispersión de los granos de polen de Pinaceae y como inciden sobre el mismo diferentes concentraciones polínicas teniendo en cuenta la altura del propio edificio. En el caso de los Capítulos II y III, son mapas que representan el riesgo aerobiológico por zonas dentro de una misma ciudad y que se crean a partir de los valores del índice AIROT de los

ejemplares de *Platanus* y Cupressaceae y de la técnica de Kriging ordinario para la obtención de valores en aquellos lugares en los que no hay puntos de muestreo.

La técnica de Kriging utiliza cálculos de semivariograma en los que se tienen en cuenta los puntos cercanos usándose 25 valores cercanos en el Capítulo II y alrededor de 40 en el Capítulo III. Esta diferencia se debe al número de ejemplares reales que hay en cada mapa a la hora de elaborarlos y a su proximidad. Con respecto al análisis de Kriging, un estudio de cinco modelos (estable, circular, esférico, exponencial y gaussiano) se realizó para cada mapa con el fin de encontrar el modelo con mejor ajuste. En el Capítulo II (5 mapas), las funciones exponencial y estable fueron los modelos óptimos en todas las ciudades, mientras que en el Capítulo III (20 mapas), los resultados fueron variables siendo el modelo exponencial el más óptimo la mayoría de las veces (12 mapas), seguido del circular (3 mapas), el gaussiano (2 mapas), estable (2 mapas) y el modelo esférico (1 mapa). Este resultado contrasta con otros autores, quienes encontraron que el modelo gaussiano era más apropiado (Manziona et al., 2019; Oteros et al., 2019a). Para el Capítulo II, los valores del rango de correlación de Spearman (r) para los modelos elegidos como óptimos oscilan entre 0,852 y 0,697, siendo el mayor el obtenido para el mapa de Badajoz y el modelo estable. Con respecto al RMSE (Root Mean Squared Error of internal validation), los valores para los modelos elegidos oscilan entre 0,087 y 0,151, siendo el de menor valor, y por tanto el mejor, el obtenido para el mapa de Cáceres y el modelo estable. En el caso del Capítulo III, los valores del rango de correlación de Spearman (r) para los modelos elegidos como óptimos oscilan entre 0,921 y 0,474, siendo el mayor el obtenido para el mapa de Zafra el mes de enero y el modelo exponencial. Con respecto al RMSE (Root Mean Squared Error of internal validation), los valores para los modelos elegidos oscilan entre 0,027 y 1,653, siendo el de menor valor, y por tanto el mejor, el obtenido para el mapa de Zafra el mes de febrero y el modelo exponencial.

Los mapas de gradientes locales sobre riesgos aerobiológicos basados en el índice AIROT pueden tener muchas aplicaciones entre las que se destacan la creación de itinerarios saludables con el fin de evitar zonas de mayor riesgo (Capítulo II) y la creación de mapas con lugares de interés turísticos y restaurantes en los que los turistas y comensales podrán observar qué lugares se encuentran en áreas de alto riesgo para evitarlos o tomar medidas preventivas (Capítulo III). Los valores más altos para el índice en el Capítulo II provenían de grandes avenidas, plazas y parques, donde la ausencia de obstáculos sólidos facilita la dispersión y donde además coincidían con una elevada densidad de ejemplares maduros. En el Capítulo III estos parámetros también fueron importantes y coincidieron con valores altos, sin embargo, los valores máximos vienen influenciados por el elevado número de ejemplares en una misma zona y sobretodo por la producción polínica (α). Esto demuestra, como se explica en la discusión del Capítulo III, la

importancia de este parámetro incluido en el índice. En cuanto a los valores de riesgo bajo, en el Capítulo II se producen en zonas con menos individuos por hectárea, siendo la mayoría de ellos inmaduros y ubicados en calles estrechas. En el Capítulo III también se producen los valores más bajos coincidiendo con un menor número de ejemplares y siendo la mayoría inmaduros, pero sobretodo en zonas donde la producción polínica (α) era baja debido a su uso como setos. Estos setos son podados con frecuencia para mantener su tamaño y uso por lo que demuestra que la poda es una herramienta eficaz para reducir la producción de polen y que coincide con otros autores como Laaidi et al. (2002). Además este parámetro podría ayudar a estimar de manera teórica el efecto de la poda sobre la polinización y que debería tenerse en cuenta para promover la sostenibilidad urbana y la regulación de la calidad del aire, mejorando la salud y el bienestar (Salmond et al., 2016).

Las modificaciones del uso del suelo, los cambios de vegetación que se producen en los espacios verdes urbanos y el cambio climático entre otros, producen cambios de tendencia de las concentraciones polínicas y de las fechas de polinización y hacen necesaria la revisión cada cierto tiempo de las herramientas de información aerobiológica para su actualización. Si las concentraciones varían o si las fechas principales de polinización cambian deberían realizarse nuevamente los calendarios polínicos y los gradientes regionales para que siempre sean lo más fiable y precisos posible, así como detectar cambios en la distribución de las especies y consecuentemente, de sus series temporales. Lo mismo ocurre con los mapas de gradientes locales o los cálculos establecidos por el índice AIROT, ya que cualquier cambio producido en el diseño de una ciudad en cuanto al tipo de vegetación utilizado o incluso en edificaciones, pueden afectar al riesgo aerobiológico establecido para *Platanus* (Capítulo II) y *Cupressaceae* (Capítulo III).

En definitiva, los continuos cambios de los diferentes paisajes y manejo urbano afectan a la producción y concentración polínica y consecuentemente podría afectar al riesgo de exposición a ciertos tipos polínicos. Esto no hace más que confirmar la necesidad de crear herramientas de información aerobiológica que proporcionen información al ciudadano y a los especialistas. Además, mapas de gradientes regionales como los del Capítulo I podrían convertirse en herramientas útiles para mostrar estos cambios de tendencias en trabajos futuros. También los mapas de gradientes locales de los Capítulos II y III, que están bastante influenciados por taxones utilizados como fuentes ornamentales y que pueden mostrar variaciones de riesgo aerobiológico según el tipo de plantas utilizadas en el diseño urbano. Además, el índice AIROT puede ayudar en el diseño tanto de zonas verdes como en el diseño urbano de las ciudades gracias a la utilización de parámetros que tienen en cuenta no solamente características biológicas de las plantas, sino también características de la propia ciudad como la altura de los edificios o la amplitud de las calles. Aquí

juega un papel fundamental el uso de las nuevas tecnologías como puede ser LiDAR gracias al cual se pueden obtener características de las ciudades no tenidas en cuenta antes en la dispersión del polen. Es de justicia comentar que los datos disponibles en los capítulos II y III fueron procedentes del primer vuelo LiDAR hasta la fecha en Extremadura (IGN 2020), con una densidad de puntos de 0.5 puntos/m³ que va a mejorar en la segunda (ya disponible, IGN 2020). La inclusión del parámetro α en el índice AIROT (Capítulo III) podría servir, además de para mostrar el riesgo aerobiológico teniendo en cuenta diferentes especies y usos, para determinar de manera teórica el efecto de la poda o determinar que taxones son más apropiados como ornamentales dependiendo de su producción polínica.

7

CONCLUSIONES



7. Conclusions

Aerobiological information tools at both local and regional levels provide valuable information for people with pollen allergy problems, general health personnel, allergy specialists and general population. The obtained information allows to take appropriate measures both in prevention and the optimisation of drugs to those who need it. In addition, the representation of the obtained information from local and regional gradients maps visually helps to interpret the results. The conclusions by chapter are as follows:

Chapter I

Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network

1. The pollen spectrum of Extremadura is influenced by the variety of taxa existing both in cities and in peri-urban areas, forming part of crops or natural vegetation. In addition to the nearby vegetation, medium and long-distance transport also influences. On the other hand, in Cupressaceae and *Platanus* pollen types, which are frequently used as ornamental sources, management (pruning, irrigation, density, etc) could influence the pollination period and thus explain the differences between cities, as well as their different features on the MPS.
2. The pollen calendars of the five cities of the Extremadura Aerobiology Network show some diversity among them with variations in both the pollen spectrum and concentrations, which could be related to the locations. In this study, there seems to be indications that latitude (indicator of temperature and duration of daylight, which may influence the climate and therefore the development of plants) influences Extremadura on the start date of *Olea*, *Quercus* and *Platanus*, amongst others. In addition, it also influences the peak date for example for *Olea*, *Platanus*, *Quercus* and Poaceae, and their lengths of the pollen season. Longitude did not show such a marked influence on the aerobiological characteristics of the cities, although *Quercus*, *Olea* and Poaceae first began their MPS on the eastern side of the region.
3. The representation and geolocation of pollen calendars using geographic gradients by colors that show the characteristics of the main pollen season such as the start dates, the peak date, the end date and the duration in each of cities, provides information in a simple, fast and visual way on the pattern of certain taxa in cities. This has great interest to allergy sufferers and healthcare professionals to take preventative measures and administer treatments to patients.

Chapter II

Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees.

1. The AIROT index (Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees) could be a useful tool for urban planning and the assessment of aerobiological risks.
2. AIROT allows to relate different biological parameters such as the abundance of pollen sources and the degree of maturity of the specimens, with physical variables of urban areas such as slope, height above sea level and width of streets and buildings. These factors can act as physical barriers in pollen dispersal.
3. The consideration of geographic characteristics of each city by using remote sensing techniques such as LiDAR and geostatistics from Kriging has allowed the creation of aerobiological risk maps in 5 cities of Extremadura for the *Platanus* sp. Regarding the Kriging analysis, the exponential and stable functions were the optimal models in all cities.
4. The development of risk maps and healthy itineraries can be valuable for allergy sufferers, health personnel, architects and urban planners to assess the aerobiological risks of urban green infrastructure and to design mitigation actions. The areas of greatest risk occur in large avenues, squares and parks, with the absence of obstacles and where there is a high density of mature specimens.

Chapter III

Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology

1. AIROT has been shown to be useful for treating the Pollenic type Cupressaceae in which several species are included and which have different pollination periods. In addition, they also present different pollen production due to the species themselves or their uses in the form of a hedge, shrub or tree and for which AIROT has been adapted.
2. The new parameter (α) added to the index allows assigning different values to the pollen production of each analyzed specimen, considering the pollen production of each species, the size and use that the specimens have and therefore their contribution to the pollen spectrum in the air.

3. The calculation of the aerobiological risk and its representation in maps for 5 cities, took into account species of the Cupressaceae family, their phenology and pollen production, allowing to inform the population of the areas where there is a greater aerobiological risk in each of the months in which they pollinate.
4. The creation of aerobiological risk maps for tourism can be valuable information for allergic patients and tourists in general, but also for urban planning and tourism councilors and for restaurant owners to structure the vegetation. Presenting the information on the aerobiological risk of a city for months, allows people to make the decision of when to visit that city depending on their allergic needs. The areas of greatest risk occur in places where a high number of individuals with high pollen production coincide (α).

7.1. Conclusiones

Las herramientas de información aerobiológica tanto a nivel local como regional proporcionan información valiosa para personas con problemas de alergias al polen y población general, personal sanitario general y especialistas en alergias. La información obtenida permite tomar medidas adecuadas tanto en materia de prevención como en la aplicación de fármacos en aquellas personas que lo necesiten. Además, la representación de la información obtenida en mapas a partir de gradientes locales y regionales ayuda de manera visual a interpretar los resultados. Las conclusiones por capítulo son las siguientes:

Capítulo I

Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network

1. El espectro de polen de Extremadura está determinado por la variedad de taxones existentes tanto en las ciudades como en zonas periurbanas, formando parte de zonas de cultivo o vegetación natural. Además de la vegetación cercana, también influye el transporte a media y larga distancia. Por otro lado, en los tipos polínicos Cupressaceae y *Platanus*, que son frecuentemente utilizados como fuentes ornamentales, el manejo (poda, riego, densidad, etc) podría explicar las diferencias entre ciudades, así como sus diferentes características en el PPP.
2. Los calendarios de polen de las cinco ciudades de la Red de Aerobiología de Extremadura muestran cierta diversidad entre ellos con variaciones tanto en el espectro del polen como en las concentraciones, pudiendo variar con su ubicación. En este estudio parece haber indicios de que la latitud (indicador de la temperatura y la duración de la luz del día, pudiendo influir en el clima y por tanto en el desarrollo de las plantas) influye en Extremadura en la fecha de inicio de *Olea*, *Quercus* y *Platanus*, entre otros. Además, también influye en la fecha pico por ejemplo para *Olea*, *Platanus*, *Quercus* y Poaceae, y también en la duración de la temporada de polen. La longitud no mostró una influencia tan marcada en las características aerobiológicas de las ciudades, aunque *Quercus*, *Olea* y Poaceae iniciaron primero su PPP en el lado este de la región.
3. La representación y geolocalización de los calendarios de polen utilizando gradientes geográficos por colores en los que se muestran las características de la temporada principal de polen como las fechas de inicio, la fecha pico, la fecha de finalización y la duración en cada una de las ciudades, proporciona información de

una manera simple, rápida y visual sobre el patrón de ciertos taxones en las ciudades. Esto puede ser de gran interés para pacientes alérgicos y profesionales de la salud para tomar medidas preventivas y administrar tratamientos a pacientes.

Capítulo II

Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees.

1. El índice AIROT (Aerobiological Index to create Risk maps for Ornamental Trees) puede ser una herramienta útil para la planificación urbana y la evaluación de los riesgos aerobiológicos.
2. AIROT permite relacionar diferentes parámetros biológicos como la abundancia de fuentes de polen y el grado de madurez de los ejemplares, con variables físicas de las zonas urbanas como son la pendiente, altura sobre el nivel del mar, amplitud de las calles y los edificios que pueden actuar como barreras físicas en la dispersión del polen.
3. La consideración de características geográficas propias de cada ciudad mediante técnicas de teledetección como LiDAR y geoestadística a partir de Kriging ha permitido crear mapas de riesgos aerobiológico en Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra para el género *Platanus* sp. Con respecto al análisis de Kriging, las funciones exponencial y estable fueron los modelos óptimos en todas las ciudades.
4. El desarrollo de los mapas de riesgo y los itinerarios saludables pueden ser valiosos para personas alérgicas, personal sanitario, arquitectos y urbanistas para evaluar los riesgos aerobiológicos de la infraestructura verde urbana y poder diseñar acciones de mitigación. Las zonas de mayor riesgo se producen en grandes avenidas, plazas y parques, con ausencia de obstáculos y donde existe una elevada densidad de ejemplares maduros.

Capítulo III

Producing Urban Aerobiological Risk Map for Cupressaceae Family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR Technology

1. AIROT ha demostrado ser útil para tratar el tipo polínico Cupressaceae en el que se engloban varias especies y que tienen diferentes periodos de polinización. Además, también presentan diferente producción polínica debido a las propias

especies o a sus usos en forma de seto, arbusto o árbol y para lo que AIROT ha sido adaptado.

2. El nuevo parámetro (α) añadido al índice permite asignar diferentes valores a la producción polínica de cada ejemplar analizado, considerando la producción de polen de cada especie, el tamaño y uso que tienen los ejemplares y por tanto su contribución al espectro de polen en el aire.
3. El cálculo del riesgo aerobiológico y su representación en mapas para las ciudades de Badajoz, Cáceres, Don Benito, Plasencia y Zafra, teniendo en cuenta especies de la familia Cupressaceae, su fenología y producción polínica, permite informar a la población de las áreas donde existe un mayor riesgo aerobiológico en cada uno de los meses en las que estas polinizan.
4. La creación de mapas de riesgos aerobiológico para el turismo puede ser información valiosa para los pacientes alérgicos y los turistas en general, pero también para concejales de planificación urbana y turismo y para los dueños de restaurantes para estructurar la vegetación. Presentar la información del riesgo aerobiológico de una ciudad por meses permite a las personas tomar la decisión de cuando visitar esa ciudad dependiendo de sus necesidades alérgicas. Las zonas de mayor riesgo se producen en lugares donde coinciden un elevado número de ejemplares con elevada producción polínica (α).

8

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



8. Referencias Bibliográficas

- AEMET (2020) Valores climatológicos normales: Badajoz Aeropuerto - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España, 2020.
- Aguilera F., Dhiab A.B., Msallem M., Orlandi F., Bonofiglio T., Ruiz-Valenzuela L., Galán C., Díaz-De la Guardia C., Giannelli A., del Mar Trigo M., García-Mozo H., Pérez-Badía R., Fornaciari M. (2015) Airborne-pollen maps for olive-growing areas throughout the Mediterranean region: spatio-temporal interpretation. *Aerobiologia*, 31, 421-34. doi: 10.1007/s10453-015-9375-5.
- Ahirwar S., Malik M.S., Ahirwar R., Shukla J.P. (2020) Identification of suitable sites and structures for artificial groundwater recharge for sustainable groundwater resource development and management. *Groundwater for Sustainable Development*, 11 doi: 10.1016/j.gsd.2020.100388.
- Albertine J.M., Manning W.J., DaCosta M., Stinson K.A., Muilenberg M.L., Rogers C.A. (2014) Projected carbon dioxide to increase grass pollen and allergen exposure despite higher ozone levels. *PloS one*, 9, e111712. doi: 10.1371/journal.pone.0111712.
- Albertini R., Ugolotti M., Peveri S., Valenti M.T., Usberti I., Ridolo E., Dall'Aglio P. (2012) Evolution of ragweed pollen concentrations, sensitization and related allergic clinical symptoms in Parma (northern Italy). *Aerobiologia*, 28, 347-54. doi: 10.1007/s10453-011-9239-6.
- Alcázar P., Galán C., Torres C., Domínguez-Vilches E. (2015) Detection of airborne allergen (Platanus a 1) in relation to Platanus pollen in Córdoba, South Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 22, 96-101. doi: 10.5604/12321966.1141376.
- Alcázar P., García-Mozo H., Trigo M.D.M., Ruiz L., González-Minero F.J., Hidalgo P., Díaz De La Guardia, C., Galán C. (2011) Platanus pollen season in Andalusia (southern Spain): Trends and modeling. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 2502-10. doi: 10.1039/c1em10355e.
- Anvari S., Miller J., Yeh C.-., Davis C.M. (2019) IgE-Mediated Food Allergy. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, 57, 244-60. doi: 10.1007/s12016-018-8710-3.
- Ariano R., Cecchi L., Voltolini S., Quercia O., Scopano E., Ciprandi G. (2017) Parietaria pollination duration: Myth or fact?. *European Annals of Allergy and Clinical Immunology*, 49, 6-10.
- Atosuo J., Karhuvaara O., Suominen E., Vilén L., Nuutila J., Putus T. (2020) Indoor exposure to *Streptomyces albus* and *Aspergillus versicolor* elevates the levels of spore-specific IgG, IgG1 and IgG3 serum antibodies in building users — A new ELISA-based assay for exposure assessment. *Science of the Total Environment*, 698 doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134335.
- Barbierato E., Bernetti I., Capecchi I., Saragosa C. (2019) Quantifying the impact of trees on land surface temperature: a downscaling algorithm at city-scale. *European Journal of Remote Sensing*, 52, 74-83. doi: 10.1080/22797254.2019.1646104.
- Barrios Gutiérrez J. (1942) Estudio polínico primaveral del campo de Sanlúcar de Barrameda y sus deducciones para la clínica. *Rev. Clin. Esp.* 6(1): 29-33.

- Beck I., Jochner S., Gilles S., McIntyre M., Buters J.T.M., Schmidt-Weber C., Behrendt H., Ring J., Menzel A., Traidl-Hoffmann C. (2013) High Environmental Ozone Levels Lead to Enhanced Allergenicity of Birch Pollen. *PloS one*, 8, e80147. doi: 10.1371/journal.pone.0080147.
- Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. (2000) The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal*, 24, 209-30. doi: 10.1080/03071375.2000.9747273.
- Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. (1998) Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99, 347-60. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00016-5.
- Bedeschi E., Campari C., Candela S., Collini G., Caranci N., Frasca G., Galassi C., Francesca G., Vigotti M.A. (2007) Urban air pollution and respiratory emergency visits at pediatric unit, Reggio Emilia, Italy. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*, 70, 261-5. doi: 10.1080/15287390600884784.
- Beggs P.J. (2004) Impacts of climate change on aeroallergens: Past and future. *Clinical and Experimental Allergy*, 34, 1507-13. doi: 10.1111/j.1365-2222.2004.02061.x.
- Belmonte J., Alarcón M., Avila A., Scialabba E., Pino D. (2008) Long-range transport of beech (*Fagus sylvatica* L.) pollen to Catalonia (north-eastern Spain). *International Journal of Biometeorology*, 52, 675-87. doi: 10.1007/s00484-008-0160-9.
- Belmonte J., Roure J. (2002) Introducción. pp 7-16. In: Valero A, Cadahía A (Eds). *Polinosis. Polen y alergia*. MRA ediciones, 174 páginas. ISBN: 84-88865-71-6.
- Berger U., Kmenta M., Bastl K. (2014) Individual pollen exposure measurements: are they feasible?. *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology*, 14, 200-5. doi: 10.1097/ACI.0000000000000060.
- Besancenot J.-., Sindt C., Thibaudon M. (2019) Pollen and climate change. Birch and grasses in metropolitan France. *Revue Francaise d'Allergologie*, 59, 563-75. doi: 10.1016/j.reval.2019.09.006.
- Bogawski P., Grewling Ł, Dziób K., Sobieraj K., Dalc M., Dylawerska B., Pupkowski D., Nalej A., Nowak M., Szymańska A., Kostecki Ł, Nowak M.M., Jackowiak B. (2019a) Lidar-derived tree crown parameters: Are they new variables explaining local birch (*Betula* sp.) pollen concentrations. *Forests*, 10 doi: 10.3390/F10121154.
- Bogawski P., Grewling Ł, Jackowiak B. (2019b) Predicting the onset of *Betula pendula* flowering in Poznań (Poland) using remote sensing thermal data. *Science of the Total Environment*, 658, 1485-99. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.295.
- Bogawski P., Borycka K., Grewling Ł, Kasprzyk I. (2019c) Detecting distant sources of airborne pollen for Poland: Integrating back-trajectory and dispersion modelling with a satellite-based phenology. *Science of the Total Environment*, 689, 109-25. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.348.
- Bogawski P., Grewling Ł, Nowak M., Smith M., Jackowiak B. (2014) Trends in atmospheric concentrations of weed pollen in the context of recent climate warming in Poznań (Western

- Poland). *International journal of biometeorology*, 58, 1759-68. doi: 10.1007/s00484-013-0781-5.
- Bogomolova E., Kirtsideli I. (2009) Airborne fungi in four stations of the St. Petersburg Underground railway system. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63, 156-60. doi: 10.1016/j.ibiod.2008.05.008.
- Bohlmann S., Shang X., Giannakaki E., Filioglou M., Saarto A., Romakkaniemi S., Komppula M. (2019) Detection and characterization of birch pollen in the atmosphere using a multiwavelength Raman polarization lidar and Hirst-type pollen sampler in Finland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 14559-69. doi: 10.5194/acp-19-14559-2019.
- Boi M., Llorens L. (2013) Annual pollen spectrum in the air of Palma de Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Aerobiologia*, 29, 385-97. doi: 10.1007/s10453-013-9288-0.
- Bonini M., Šikoparija B., Skjøth C.A., Cislighi G., Colombo P., Testoni C., A.I.A.-R.I.M.A., POLLnet, Smith M. (2018) Ambrosia pollen source inventory for Italy: a multi-purpose tool to assess the impact of the ragweed leaf beetle (*Ophraella communa* LeSage) on populations of its host plant. *Int J Biometeorol*, 62, 597-608. doi: 10.1007/s00484-017-1469-z.
- Borgogno Mondino E., Fissore V., Falkowski M.J., Palik B. (2020) How far can we trust forestry estimates from low-density LiDAR acquisitions? The Cutfoot Sioux experimental forest (MN, USA) case study. *International Journal of Remote Sensing*, 41, 4549-67. doi: 10.1080/01431161.2020.1723173.
- Borna E., Nwaru B.I., Bjerg A., Mincheva R., Rådinger M., Lundbäck B., Ekerljung L. (2019) Changes in the prevalence of asthma and respiratory symptoms in western Sweden between 2008 and 2016. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 74, 1703-15. doi: 10.1111/all.13840.
- Bostock J. (1819) Case of a periodical affection of the eyes and chest. *Med. Chir. Transact.* 10: 161–165.
- Bousquet J., Anto J.M., Annesi-Maesano I., Dedeu T., Dupas E., Pépin J.-., Eyindanga L.S.Z., Arnavielhe S., Ayache J., Basagana X., Benveniste S., Venturos N.C., Chan H.K., Cheraitia M., Dauvilliers Y., Garcia-Aymerich J., Jullian-Desayes I., Dinesh C., Laune D., Dac J.L., Nujurally I., Pau G., Picard R., Rodo X., Tamisier R., Bewick M., Billo N.E., Czarlewski W., Fonseca J., Klimek L., Pfaar O., Bourez J.-. (2018) POLLAR: Impact of air POLLution on Asthma and Rhinitis; A European Institute of Innovation and Technology Health (EIT Health) project. *Clinical and Translational Allergy*, 8 doi: 10.1186/s13601-018-0221-z.
- Bousquet J., Khaltayev N., Cruz A.A., Denburg J., Fokkens W.J., Togias A., Zuberbier T., Baena-Cagnani C.E., Canonica G.W., Van Weel C., Agache I., Ait-Khaled N., Bachert C., Blaiss M.S., Bonini S., Boulet L.-., Bousquet P.-., Camargos P., Carlsen K.-., Chen Y., Custovic A., Dahl R., Demoly P., Douagui H., Durham S.R., Van Wijk R.G., Kalayci O., Kaliner M.A., Kim Y.-., Kowalski M.L., Kuna P., Le L.T.T., Lemiere C., Li J., Lockey R.F., Mavale-Manuel S., Meltzer E.O., Mohammad Y., Mullol J., Naclerio R., O'Hehir R.E., Ohta K., Ouedraogo S., Palkonen S., Papadopoulos N., Passalacqua G., Pawankar R., Popov T.A., Rabe K.F., Rosado-Pinto J., Scadding G.K., Simons F.E.R., Toskala E., Valovirta E., Van Cauwenberge P., Wang D.-., Wickman M., Yawn B.P., Yorgancioglu A., Yusuf O.M., Zar H., Annesi-Maesano I., Bateman E.D., Kheder A.B., Boakye D.A., Bouchard J., Burney P., Busse W.W., Chan-Yeung

- M., Chavannes N.H., Chuchalin A., Dolen W.K., Emuzyte R., Grouse L., Humbert M., Jackson C., Johnston S.L., Keith P.K., Kemp J.P., Klossek J.-., Larenas-Linnemann D., Lipworth B., Malo J.-., Marshall G.D., Naspitz C., Nekam K., Niggemann B., Nizankowska-Mogilnicka E., Okamoto Y., Orru M.P., Potter P., Price D., Stoloff S.W., Vandenplas O., Viegi G., Williams D. (2008) Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma (ARIA) 2008 update (in collaboration with the World Health Organization, GA2LEN and AllerGen). *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 63, 8-160. doi: 10.1111/j.1398-9995.2007.01620.x.
- Bricchi E., Frenguelli G., Mincigrucci G. (2000) Experimental results about *Platanus* pollen deposition. *Aerobiologia*, 16, 347-52. doi: 10.1023/A:1026701028901.
- Burbach G.J., Heinzerling L.M., Edenharter G., Bachert C., Bindslev-Jensen C., Bonini S., Bousquet J., Bousquet-Rouanet L., Bousquet P.J., Bresciani M., Bruno A., Canonica G.W., Darsow U., Demoly P., Durham S., Fokkens W.J., Giavi S., Gjomarkaj M., Gramiccioni C., Haahtela T., Kowalski M.L., Magyar P., Murakozi G., Orosz M., Papadopoulos N.G., Rohnelt C., Stingl G., Todo-Bom A., von Mutius E., Wiesner A., Wohrl S., Zuberbier T. (2009) GA2LEN skin test study II: clinical relevance of inhalant allergen sensitizations in Europe. *Allergy*, 64, 1507-15. doi: 10.1111/j.1398-9995.2009.02089.x.
- Bush J. (2020) The role of local government greening policies in the transition towards nature-based cities. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 35, 35-44. doi: 10.1016/j.eist.2020.01.015.
- Buters J.T.M., Antunes C., Galveias A., Bergmann K.C., Thibaudon M., Galán C., Schmidt-Weber C., Oteros J. (2018a) Pollen and spore monitoring in the world. *Clinical and Translational Allergy*, 8 doi: 10.1186/s13601-018-0197-8.
- Buters J., Schmidt-Weber C., Oteros J. (2018b) Next-generation pollen monitoring and dissemination. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 73, 1944-5. doi: 10.1111/all.13585.
- Buters J., Prank M., Sofiev M., Pusch G., Albertini R., Annesi-Maesano I., Antunes C., Behrendt H., Berger U., Brandao R., Celenk S., Galan C., Grewling L., Jackowiak B., Kennedy R., Rantio-Lehtimäki A., Reese G., Sauliene I., Smith M., Thibaudon M., Weber B., Cecchi L. (2015) Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographic location and time in season the HIALINE working group. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 136, 87,95.e6. doi: 10.1016/j.jaci.2015.01.049.
- Caiaffa M.F., Macchia L., Strada S., Bariletto G., Scarpelli F., Tursi A. (1993) Airborne Cupressaceae pollen in Southern Italy. *Annals of Allergy*, 71, 45-50.
- Caillaud D.M., Martin S., Ségala C., Vidal P., Lecadet J., Pellier S., Rouzaire P., Tridon A., Evrard B. (2015) Airborne pollen levels and drug consumption for seasonal allergic rhinoconjunctivitis: A 10-year study in France. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 70, 99-106. doi: 10.1111/all.12522.
- Camacho I.C., Caeiro E., Ferro R., Camacho R., Câmara R., Grinn-Gofroń A., Smith M., Strzelczak A., Nunes C., Morais-Almeida M. (2017) Spatial and temporal variations in the Annual Pollen Index recorded by sites belonging to the Portuguese Aerobiology Network. *Aerobiologia*, 33, 265-79. doi: 10.1007/s10453-016-9468-9.

- Candau P., Conde J., Chaparro A. (1981) Palinología en Oleaceae. Incidencia de su polen en el aire de Sevilla, clínica de su polinosis. *Botánica macaronés* 8(9): 89-102.
- Cariñanos P., Adinolfi C., de la Guardia, C. D., De Linares C., Casares-Porcel M. (2016) Characterization of allergen emission sources in urban areas. *Journal of environmental quality*, 45, 244-52. doi: 10.2134/jeq2015.02.0075.
- Cariñanos P., Casares-Porcel M., Quesada-Rubio J.-. (2014) Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 123, 134-44. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.009.
- Cariñanos P., Casares-Porcel M. (2011) Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 101, 205-14. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.03.006.
- Cariñanos P., Alcázar P., Galán C., Domínguez E. (2002) Privet pollen (*Ligustrum* sp.) as potential cause of pollinosis in the city of Cordoba, south-west Spain. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 57, 92-7. doi: 10.1034/j.1398-9995.2002.1o3261.x.
- Carrasco S. (2010) Aproximación a la Estadística desde las Ciencias Sociales. Universidad de Valencia. Recuperado de <https://www.uv.es> el 25 de mayo de 2020.
- Carrión J. S., Ochando J., Fernández S., Blasco R., Rosell J., Munuera M., Amorós G., Martín-Lerma I., Finlayson S., Giles F., Jennings R., Finalyson G., Giles-Pacheco F., Rodríguez-Vidal J., Finlayson C. (2018) Last Neanderthals in the warmest refugium of Europe: Palynological data from Vanguard Cave. *Review of Palaeobotany and Palynology* 259, 63-80.
- Castroviejo S., Laínz M., López González G., Montserrat P., Muñoz Garmendia F., Paiva J., Villar L. (eds.) (1990) *Flora ibérica 2*. Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid.
- Castroviejo S., Laínz M., López González G., Montserrat P., Muñoz Garmendia F., Paiva J., Villar L. (eds.) (1986) *Flora ibérica 1*. Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid.
- Cecchi L., Morabito M., Domeneghetti M.P., Crisci A., Onorari M., Orlandini S. (2006) Long distance transport of ragweed pollen as a potential cause of allergy in central Italy. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 96, 86-91.
- Chaphekar S.B. (2009) Botanist in urban environments. *EnviroNews: International Society of Environmental Botanists*, 15, 4-6.
- Charco J., Devesa J., Ortega-Olivencia A. (2008) *Árboles y arbustos autóctonos de Extremadura*. Centro de Investigaciones Ambientales del Mediterráneo (CIAMED). 311 pp, ISBN 978-84-612-5680-8.
- Charpin D., Pichot C., Belmonte J., Sutra J.-., Zidkova J., Chanez P., Shahali Y., Sénéchal H., Poncet P. (2019) Cypress Pollinosis: from Tree to Clinic. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, 56, 174-95. doi: 10.1007/s12016-017-8602-y.
- Chiesura A. (2004) The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129-38. doi: 10.1016/j.landurbplan.2003.08.003.

- Cho S.-, Myong J.-, Kim W.-, Park C., Lee S.J., Lee S.H., Lee D.-. (2018) Profiles of environmental mold: Indoor and outdoor air sampling in a hematology hospital in seoul, south korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 doi: 10.3390/ijerph15112560.
- Ciani F., Marchi G., Dell'Olmo L., Foggi B., Mariotti Lippi M. (2020) Contribution of land cover and wind to the airborne pollen recorded in a South European urban area. *Aerobiologia* doi: 10.1007/s10453-020-09634-y.
- Costa C., Menesatti P., Brighetti M.A., Travaglini A., Rimatori V., Businco A.D.R., Pelosi S., Bianchi A., Matricardi P.M., Tripodi S. (2014) Pilot study on the short-term prediction of symptoms in children with hay fever monitored with e-Health technology. *European Annals of Allergy and Clinical Immunology*, 46, 216-25.
- Coutts C., Hahn M. (2015) Green infrastructure, ecosystem services, and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 9768-98. doi: 10.3390/ijerph120809768.
- Cristofori A., Cristofolini F., Gottardini E. (2010) Twenty years of aerobiological monitoring in Trentino (Italy): Assessment and evaluation of airborne pollen variability. *Aerobiologia*, 26, 253-61. doi: 10.1007/s10453-010-9161-3.
- Crouzy B., Stella M., Konzelmann T., Calpini B., Clot B. (2016) All-optical automatic pollen identification: Towards an operational system. *Atmospheric Environment*, 140, 202-12. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.062.
- Csépe Z., Leelőssy Á., Mányoki G., Kajtor-Apatini D., Udvardy O., Péter B., Páldy A., Gelybó G., Szigeti T., Pándics T., Kofol-Seliger A., Simčič A., Leru P.M., Eftimie A.-, Šikoparija B., Radišić P., Stjepanović B., Hrga I., Večenaj A., Vucić A., Peroš-Pucar D., Škorić T., Ščevková J., Bastl M., Berger U., Magyar D. (2019) The application of a neural network-based ragweed pollen forecast by the Ragweed Pollen Alarm System in the Pannonian biogeographical region. *Aerobiologia* doi: 10.1007/s10453-019-09615-w.
- Ćwik A., Kasprzyk I., Wójcik T., Borycka K., Cariñanos P. (2018) Attractiveness of urban parks for visitors versus their potential allergenic hazard: A case study in Rzeszów, Poland. *Urban Forestry & Urban Greening*, 35, 221-9. doi: 10.1016/j.ufug.2018.09.009.
- D'Amato G., Cecchi L., Bonini S., Nunes C., Annesi-Maesano I., Behrendt H., Liccardi G., Popov T., Van Cauwenberge P. (2007) Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 62, 976-90. doi: 10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x.
- D'Amato G., Chatzigeorgiou G., Corsico R., Gioulekas D., Jäger L., Jäger S., Kontou-Fili K., Kouridakis S., Liccardi G., Meriggi A., Palma-Carlos A., Palma-Carlos M.L., Pagan Aleman A., Parmiani S., Puccinelli P., Russo M., Spielsma F.T.M., Torricelli R., Wüthrich B. (1997) Evaluation of the prevalence of skin prick test positivity to *Alternaria* and *Cladosporium* in patients with suspected respiratory allergy. A European multicenter study promoted by the subcommittee on Aerobiology and environmental aspects of inhalant allergens of the European Academy of allergology and clinical immunology. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 52, 711-6. doi: 10.1111/j.1398-9995.1997.tb01227.x.

- D'amato M., Cecchi L., Annesi-Maesano I., D'amato G. (2018) News on climate change, air pollution, and allergic triggers of asthma. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 28, 91-7. doi: 10.18176/jiaci.0228.
- Damialis A., Halley J.M., Gioulekas D., Vokou D. (2007) Long-term trends in atmospheric pollen levels in the city of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 41, 7011-21. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.05.009.
- Darus F.M., Misa N.A.A., Ismail Z.S., Mahidin H. (2019) Assessment of antifungal agent for the treatment of *Culvularia* sp. and *Lichtheimia* sp. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 373 doi: 10.1088/1755-1315/373/1/012019.
- De Linares C., Alcázar P., Valle A.M., Díaz de la Guardia, C., Galán C. (2019) *Parietaria* major allergens vs pollen in the air we breathe. *Environmental Research*, 176 doi: 10.1016/j.envres.2019.05.045.
- Devadas R., Huete A.R., Vicendese D., Erbas B., Beggs P.J., Medek D., Haberle S.G., Newnham R.M., Johnston F.H., Jaggard A.K., Campbell B., Burton P.K., Katelaris C.H., Newbiggin E., Thibaudon M., Davies J.M. (2018) Dynamic ecological observations from satellites inform aerobiology of allergenic grass pollen. *Science of the Total Environment*, 633, 441-51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.191.
- Devesa J.A. (1995) *Vegetación y flora de Extremadura*. Universitas Editorial. España. 773 pp.
- Devesa J., Tormo-Molina R., Ruíz T. (1995) El clima. En *Vegetación y Flora de Extremadura*. 37-48. Universitas Editorial. ISBN 84-88938-03-9.
- De Weger L.A., Molster F., de Raat K., den Haan J., Romein J., van Leeuwen W., de Groot H., Mostert M., Hiemstra P.S. (2020) A new portable sampler to monitor pollen at street level in the environment of patients. *Science of the Total Environment*, 2020, 140404. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140404
- De Weger L.A., Beerthuizen T., Hiemstra P.S., Sont J.K. (2014) Development and validation of a 5-day-ahead hay fever forecast for patients with grass-pollen-induced allergic rhinitis. *International journal of biometeorology*, 58, 1047-55. doi: 10.1007/s00484-013-0692-5.
- De Weger L.A., Bergmann K.C., Rantio-Lehtimäki A., Dahl A., Buters J., Déchamp C., Belmonte J., Thibaudon M., Cecchi L., Besancenot J.-., Galán C., Waisel Y. (2013) Impact of pollen. *Allergenic Pollen: A Review of the Production, Release, Distribution and Health Impacts*, 9789400748811, 161-215. doi: 10.1007/978-94-007-4881-1_6.
- Diario Hoy de Extremadura (2007). La UEx ya envía sms a los alérgicos sobre los días más críticos. Recuperado de www.hoy.es el 04 de mayo de 2020.
- Dorji T., Hopping K.A., Meng F., Wang S., Jiang L., Klein J.A. (2020) Impacts of climate change on flowering phenology and production in alpine plants: The importance of end of flowering. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 291 doi: 10.1016/j.agee.2019.106795.
- Duinker P.N., Ordoñez C., Steenberg J.W.N., Miller K.H., Toni S.A., Nitoslawski S.A. (2015) Trees in canadian cities: Indispensable life form for urban sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 7, 7379-96. doi: 10.3390/su7067379.

- Edmonds R. L., Benninhoff W. S. (1973) Aerobiology and its modern applications. US/IPB Aerobiology Report n° 3. Botany Department, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan: 1-18.
- Ehrlén J., Valdés A. (2020) Climate drives among-year variation in natural selection on flowering time. *Ecology Letters*, 23, 653-62. doi: 10.1111/ele.13468.
- Ekkel E.D., de Vries S. (2017) Nearby green space and human health: Evaluating accessibility metrics. *Landscape and Urban Planning*, 157, 214-20. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.06.008.
- El Periódico de Extremadura (2019). La App que vigila el polen. Recuperado de www.elperiodicoextremadura.com el 04/05/2020.
- Elvira-Rendueles B., Moreno J.M., Costa I., Bañón D., Martínez-García M.J., Moreno-Grau S. (2019) Pollen calendars of Cartagena, Lorca, and Murcia (Region of Murcia), southeastern Iberian Peninsula: 2010–2017. *Aerobiologia*, 35, 477-96. doi: 10.1007/s10453-019-09578-y.
- Farzinmoghdam M., Mostafavi N., Infield E.H., Hoque S. (2019) Developing an automated method for the application of lidar in iumat land-use model: Analysis of land-use changes using building-form parameterization, GIS, and artificial neural networks. *Journal of Green Building*, 14, 1-30. doi: 10.3992/1943-4618.14.1.1.
- Fernández J. (1992) Allergenic activity of date palm (*Phoenix dactylifera*) pollen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 89, 148.
- Fernández-González M., Guedes A., Abreu I., Rodríguez-Rajo F.J. (2013) Pla a_1 aeroallergen immunodetection related to the airborne *Platanus* pollen content. *Science of the Total Environment*, 463-464, 855-60. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.062.
- Fernández-Rodríguez S., Maya-Manzano J.M., Colín A.M., Pecero-Casimiro R., Buters J., Oteros J. (2020) Understanding hourly patterns of *Olea* pollen concentrations as tool for the environmental impact assessment. *Science of the Total Environment*, 736 doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139363.
- Fernández-Rodríguez S., Durán-Barroso P., Silva-Palacios I., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M., Gonzalo-Garijo Á., Monroy-Colin A. (2018a) Environmental assessment of allergenic risk provoked by airborne grass pollen through forecast model in a Mediterranean region. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1304-15. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.226.
- Fernández-Rodríguez S., Cortés-Pérez J.P., Muriel P.P., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M. (2018b) Environmental impact assessment of Pinaceae airborne pollen and green infrastructure using BIM. *Automation in Construction*, 96, 494-507. doi: 10.1016/j.autcon.2018.10.011.
- Fernández-Rodríguez S., Durán-Barroso P., Silva-Palacios I., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J., Gonzalo-Garijo Á. (2016a) Regional forecast model for the *Olea* pollen season in Extremadura (SW Spain). *International Journal of Biometeorology*, 60, 1509-17. doi: 10.1007/s00484-016-1141-z.
- Fernández-Rodríguez S., Durán-Barroso P., Silva-Palacios I., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M., Gonzalo-Garijo Á. (2016b) *Quercus* long-term pollen season trends in the southwest of

- the Iberian Peninsula. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 152-9. doi: 10.1016/j.psep.2015.11.008.
- Fernández-Rodríguez S., Durán-Barroso P., Silva-Palacios I., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M., Gonzalo-Garijo Á. (2016c) Forecast model of allergenic hazard using trends of Poaceae airborne pollen over an urban area in SW Iberian Peninsula (Europe). *Natural Hazards*, 84, 121-37. doi: 10.1007/s11069-016-2411-0.
- Fernández-Rodríguez S., Sadyś M., Smith M., Tormo-Molina R., Skjøth C.A., Maya-Manzano J.M., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo Á. (2015) Potential sources of airborne *Alternaria* spp. spores in South-west Spain. *Science of the Total Environment*, 533, 165-76. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.031.
- Fernández-Rodríguez S., Skjøth C.A., Tormo-Molina R., Brandao R., Caeiro E., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo Á, Smith M. (2014) Identification of potential sources of airborne *Olea* pollen in the Southwest Iberian Peninsula. *International journal of biometeorology*, 58, 337-48. doi: 10.1007/s00484-012-0629-4.
- Ferreira F., Gadermaier G., Wallner M. (2014) Tree pollen allergens. *Global Atlas of Allergy*, pp. 18–21.
- Fotiou C., Fotiou C., Damialis A., Damialis A., Krigas N., Krigas N., Halley J., Halley J., Vokou D., Vokou D. (2011) *Parietaria judaica* flowering phenology, pollen production, viability and atmospheric circulation, and expansive ability in the urban environment: impacts of environmental factors. *International Journal of Biometeorology*, 55, 35-50. doi: 10.1007/s00484-010-0307-3.
- Frenguelli G. (1998) The contribution of Aerobiology to agriculture. *Aerobiologia* 14 (2, 3): 95-100.
- Galán C., Ariatti A., Bonini M., Clot B., Crouzy B., Dahl A., Fernandez-González D., Frenguelli G., Gehrig R., Isard S., Levetin E., Li D.W., Mandrioli P., Rogers C.A., Thibaudon M., Sauliene I., Skjøth C., Smith M., Sofiev M. (2017) Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia*, 33, 293-5. doi: 10.1007/s10453-017-9496-0.
- Galán C., Smith M., Thibaudon M., Frenguelli G., Oteros J., Gehrig R., Berger U., Clot B., Brandao R. (2014) Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30, 385-95. doi: 10.1007/s10453-014-9335-5.
- Galan C., Antunes C., Brandao R., Torres C., Garcia-Mozo H., Caeiro E., Ferro R., Prank M., Sofiev M., Albertini R., Berger U., Cecchi L., Celenk S., Grewling L., Jackowiak B., Jäger S., Kennedy R., Rantio-Lehtimäki A., Reese G., Sauliene I., Smith M., Thibaudon M., Weber B., Weichenmeier I., Pusch G., Buters J.T.M. (2013) Airborne olive pollen counts are not representative of exposure to the major olive allergen *Ole e 1*. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 68, 809-12. doi: 10.1111/all.12144.
- Galán C., Cariñanos P., Alcázar P., Dominguez-Vilches E. (2007) Spanish Aerobiology Network (REA) Management and Quality Manual. Servicio de Publicaciones Universidad de Córdoba.
- Galán C., García-Mozo H., Vázquez L., Ruiz L., De La Guardia, C. D., Trigo M.M. (2005) Heat requirement for the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in several sites in Andalusia

- and the effect of the expected future climate change. *International Journal of Biometeorology*, 49, 184-8. doi: 10.1007/s00484-004-0223-5.
- Galán C., Fuillerat M.J., Comtois P., Domínguez E. (1998) A predictive study of Cupressaceae pollen season onset, severity, maximum value and maximum value date. *Aerobiologia*, 14, 195-9. doi: 10.1007/BF02694206.
- Galán C., Cuevas J., Infante F., Domínguez E. (1989) Seasonal and diurnal variation of pollen from Gramineae in the atmosphere of Córdoba Spain. *Allergol Immunopathol* 17(5):245–249
- Gamba P., Houshmand B. (2000) Digital surface models and building extraction: a comparison of IFSAR and LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 1959-68. doi: 10.1109/36.851777.
- García M., Riaño D., Chuvieco E., Salas J., Danson F.M. (2011) Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1369-79. doi: 10.1016/j.rse.2011.01.017.
- García-Mozo H., Oteros J.A., Galán C. (2016) Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain. *Science of the Total Environment*, 548-549, 221-8. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.005.
- García-Mozo H., Yaezel L., Oteros J., Galán C. (2014) Statistical approach to the analysis of olive long-term pollen season trends in southern Spain. *Science of the Total Environment*, 473-474, 103-9. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.142.
- Gautam V., Sarkar S. (2020) Smart agriculture: The age of drones in agriculture. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 51 doi: 10.1007/978-3-030-37393-1_34.
- Ghiani A., Aina R., Asero R., Bellotto E., Citterio S. (2012) Ragweed pollen collected along high-traffic roads shows a higher allergenicity than pollen sampled in vegetated areas. *Allergy*, 67, 887-94. doi: 10.1111/j.1398-9995.2012.02846.x.
- Ghitarrini S., Tedeschini E., Timorato V., Frenguelli G. (2017) Climate change: consequences on the pollination of grasses in Perugia (Central Italy). A 33-year-long study. *International Journal of Biometeorology*, 61, 149-58. doi: 10.1007/s00484-016-1198-8.
- Giner M.M., García J.S.C., Sellés J.G. (1999) Aerobiology of artemisia airborne pollen in Murcia (SE Spain) and its relationship with weather variables: Annual and intradiurnal variations for three different species. Wind vectors as a tool in determining pollen origin. *International journal of biometeorology*, 43, 51-63. doi: 10.1007/s004840050116.
- Gioulekas D., Papakosta D., Damialis A., Spieksma F., Giouleka P., Patakas D. (2004) Allergenic pollen records (15 years) and sensitization in patients with respiratory allergy in Thessaloniki, Greece. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 59, 174-84. doi: 10.1046/j.1398-9995.2003.00312.x.
- Givnish, T. J. (1980) Ecological constraints on the evolution of breeding systems in seed plants: Dioecy and dispersal in gymnosperms. *Evolution*, 34(5), 959–972.

- González-Naharro R., Quirós E., Fernández-Rodríguez S., Silva-Palacios I., Maya-Manzano J.M., Tormo-Molina R., Pecero-Casimiro R., Monroy-Colin A., Gonzalo-Garijo Á (2019) Relationship of NDVI and oak (*Quercus*) pollen including a predictive model in the SW Mediterranean region. *Science of the Total Environment*, 676, 407-19. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.213.
- González-Parrado Z., Valencia-Barrera R.M., Vega-Maray A.M., Fuertes-Rodríguez C.R., Fernández-González D. (2014) The weak effects of climatic change on *Plantago* pollen concentration: 17 years of monitoring in Northwestern Spain. *International Journal of Biometeorology*, 58, 1641-50. doi: 10.1007/s00484-013-0768-2.
- Gonzalo-Garijo M.A., Tormo-Molina R., Muñoz-Rodríguez A.F., Silva-Palacios I. (2006) Differences in the spatial distribution of airborne pollen concentrations at different urban locations within a city. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 16, 37-43.
- Grégori M., Schmitt J.P., Pallarès C., Rozenfarb D., Pautz F., Astafieff K., Benkhelifa K., Sez nec G., Mahevas T., Wilcke C., Bonnefoy M., Gardeur E., Honoré N., Moniot S., Jonquière s A., Boulangé M., Kanny G. (2019) Pollin'air : un réseau de citoyens au service des personnes allergiques. *Revue Française d'Allergologie*, 59, 533-42. doi: 10.1016/j.reval.2019.09.004.
- Gregory P.H. (1973) *The microbiology of the atmosphere*. Clarke, Doble & Brendon Ltd, Plymouth.
- Haahtela T., Holgate S., Pawankar R., Akdis C.A., Benjaponpitak S., Caraballo L., Demain J., Portnoy J., von Hertzen L. (2013) The biodiversity hypothesis and allergic disease: world allergy organization position statement. *The World Allergy Organization journal*, 6, 3. doi: 10.1186/1939-4551-6-3.
- Hidalgo P.J., Galán C., Domínguez E. (2003) Male phenology of three species of *Cupressus*: Correlation with airborne pollen. *Trees - Structure and Function*, 17, 336-44.
- Hidalgo P.J., Galán C., Domínguez E. (1999) Pollen production of the genus *Cupressus*. *Grana*, 38, 296-300. doi: 10.1080/001731300750044519.
- Hirst J.M. (1991) *Aerobiology in plant pathology*. Grana, 30, 25-9. doi: 10.1080/00173139109427765.
- Hirst J.M. (1952) An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 257-65.
- Holme J.A., Øya E., Afanou A.K.J., Øvrevik J., Eduard W. (2020) Characterization and pro-inflammatory potential of indoor mold particles. *Indoor Air* doi: 10.1111/ina.12656.
- Honecker A., Schumann H., Becirevic D., Klingbeil L., Volland K., Forberig S., Jansen M., Paulsen H., Kuhlmann H., Léon J. (2020) Plant, space and time - linked together in an integrative and scalable data management system for phenomic approaches in agronomic field trials. *Plant Methods*, 16, 55. doi: 10.1186/s13007-020-00596-3.
- Horváth A., Balásházy I., Farkas A., Sárkány Z., Hofmann W., Czitrovszky A. & Dobos E. (2011) Quantification of airway deposition of intact and fragmented pollens, *International Journal of Environmental Health Research*, 21:6, 427-440. doi: 10.1080/09603123.2011.574269

- Huang L., Koubek T., Weiser M., Herben T. (2018) Environmental drivers and phylogenetic constraints of growth phenologies across a large set of herbaceous species. *Journal of Ecology*, 106, 1621-33. doi: 10.1111/1365-2745.12927.
- Hughes D.D., Mampage C.B.A., Jones L.M., Liu Z., Stone E.A. (2020) Characterization of Atmospheric Pollen Fragments during Springtime Thunderstorms. *Environmental science & technology letters*, 7, 409-14. doi: 10.1021/acs.estlett.0c00213.
- Huynen M., Menne B. (2003) Phenology and Human Health: Allergic Disorders. Report of a WHO Meeting, Rome, Italy, 16–17 January 2003. Health and Global Environmental Change, Series No. 1 (EUR/03/5036791 and EUR/02/5036813). Geneva: World Health Organization;2003.
- Igea Aznar J.M. (2006) Alergia, la epidemia del siglo XXI: claves para identificarla y tratarla. Málaga: Arguval 2006.
- IGN. Instituto Geográfico Nacional (2020) <https://www.ign.es/web/ign/portal>.
- Iglesias Fernández I., Rodríguez-Rajo F.J., Méndez J. (2007) Behavior of *Platanus hispanica* pollen, an important spring aeroallergen in northwestern Spain. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 17, 145-56.
- INE (2019a) Cifras oficiales de población de los municipios españoles. Instituto Nacional de Estadística. Recuperado de <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm> el 27 de mayo de 2020.
- INE (2019b) Anuario estadístico de España 2019. Instituto Nacional de Estadística. Recuperado de https://www.ine.es/prodyser/pubweb/anuario19/anu19_12agric.pdf el 16 de octubre de 2020.
- Ives C.D., Lentini P.E., Threlfall C.G., Ikin K., Shanahan D.F., Garrard G.E., Bekessy S.A., Fuller R.A., Mumaw L., Rayner L., Rowe R., Valentine L.E., Kendal D. (2016) Cities are hotspots for threatened species. *Global Ecology and Biogeography*, 25, 117-26. doi: 10.1111/geb.12404.
- Izco J., Ladero M., Sáez de Rivas C. (1972) Flora alergógena de España. *Anales R. Acad. Farm. (Madrid)* 38(3): 521-570.
- Jeong G., Choi K., Spohn M., Park S.J., Huwe B., Ließ M. (2017) Environmental drivers of spatial patterns of topsoil nitrogen and phosphorus under monsoon conditions in a complex terrain of South Korea. *PLoS ONE*, 12 doi: 10.1371/journal.pone.0183205.
- Jiménez Díaz C. (1932) El asma y otras enfermedades alérgicas. Ed. España. Madrid.
- Johansson S.G.O., Bieber T., Dahl R., Friedmann P.S., Lanier B.Q., Locky R.F., Motala C., Ortega Martell J.A., Platts-Mills T.A.E., Ring J., Thien F., Van Cauwenberge P., Williams H.C. (2005) Revised nomenclature for allergy for global use - Report of the Nomenclature Review Committee of the World Allergy Organization, October 2003. *Allergy and Clinical Immunology International*, 17, 4-8. doi: 10.1027/0838-1925.17.1.4.
- Johansson S.G.O. (2002) A revised nomenclature for allergy - A condensed version of the EAACI position statement from the EAACI nomenclature task force. *Allergy and Clinical Immunology International*, 14, 279-87. doi: 10.1027/0838-1925.14.6.279.

- Kanja K., Karahalil U., Çil B. (2020) Modeling stand parameters for *Pinus brutia* (Ten.) using airborne LiDAR data: A case study in Bergama. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14 doi: 10.1117/1.JRS.14.022205.
- Karrer G., Skjøth C.A., Šikoparija B., Smith M., Berger U., Essl F. (2015) Ragweed (*Ambrosia*) pollen source inventory for Austria. *Science of the Total Environment*, 523, 120-8. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.108.
- Katotomichelakis M., Nikolaidis C., Makris M., Zhang N., Aggelides X., Constantinidis T.C., Bachert C., Danielides V. (2015) The clinical significance of the pollen calendar of the Western Thrace/northeast Greece region in allergic rhinitis. *International Forum of Allergy and Rhinology*, 5, 1156-63. doi: 10.1002/alr.21623.
- Katz D.S.W., Batterman S.A. (2019) Allergenic pollen production across a large city for common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*). *Landscape and Urban Planning*, 190, 103615. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103615.
- Kawashima S., Thibaudon M., Matsuda S., Fujita T., Lemonis N., Clot B., Oliver G. (2017) Automated pollen monitoring system using laser optics for observing seasonal changes in the concentration of total airborne pollen. *Aerobiologia*, 33, 351-62. doi: 10.1007/s10453-017-9474-6.
- Kennedy L.L. (1953) Alberta pollen survey. *Journal of Allergy*, 24, 355-63. doi: 10.1016/0021-8707(53)90181-6.
- Khwarahm N.R., Dash J., Skjøth C.A., Newnham R.M., Adams-Groom B., Head K., Caulton E., Atkinson P.M. (2017) Mapping the birch and grass pollen seasons in the UK using satellite sensor time-series. *Science of the Total Environment*, 578, 586-600. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.004.
- Kim B.-, Park C.-, Cho J.H., Lee M.H. (2020) Trends in skin prick test according to seasons: Results of a Korean multi-center study. *Auris Nasus Larynx*, 47, 90-7. doi: 10.1016/j.anl.2019.05.010.
- Kmenta M., Bastl K., Jäger S., Berger U. (2014) Development of personal pollen information—the next generation of pollen information and a step forward for hay fever sufferers. *International Journal of Biometeorology*, 58, 1721-6. doi: 10.1007/s00484-013-0776-2.
- Knox R.B., Suphioglu C., Taylor P., Desai R., Watson H.C., Peng J.L., Bursill L.A. (1997) Major grass pollen allergen Lol p 1 binds to diesel exhaust particles: Implications for asthma and air pollution. *Clinical and Experimental Allergy*, 27, 246-51. doi: 10.1111/j.1365-2222.1997.tb00702.x.
- Kumar D., Shekhar S. (2016) Linear gradient analysis of kinetic temperature through geostatistical approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2 doi: 10.1007/s40808-016-0198-3.
- Kurganskiy A., Ambelas Skjøth C., Baklanov A., Sofiev M., Saarto A., Severova E., Smyshlyaev S., Kaas E. (2020) Incorporation of pollen data in source maps is vital for pollen dispersion models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 2099-121. doi: 10.5194/acp-20-2099-2020.

- Laaidi K., Carli P.-. (2002) Detecting emerging risks in environmental health: The example of cypress pollinosis in Burgundy. *Environnement, Risques et Sante*, 1, 217-22.
- Li C., Wang Z., Li B., Peng Z.-., Fu Q. (2019) Investigating the relationship between air pollution variation and urban form. *Building and Environment*, 147, 559-68. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.038.
- Linskens H.F., Cresti M. (2000) Pollen-allergy as an ecological phenomenon: A review. *Plant Biosystems*, 134, 341-52. doi: 10.1080/11263500012331350495.
- Liu J., Su S., He Z., Jiang L., Gu X., Xu D., Ma R., Hong W. (2020) Relationship between *Pinus taiwanensis* seedling regeneration and the spatial heterogeneity of soil nitrogen in Daiyun Mountain, southeast China. *Ecological Indicators*, 115, 106398. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106398.
- Liu Z., Niu H., Rong R., Cao G., He B.-., Deng Q. (2020) An experiment and numerical study of resuspension of fungal spore particles from HVAC ducts. *Science of the Total Environment*, 708 doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134742.
- Lo F., Bitz C.M., Battisti D.S., Hess J.J. (2019) Pollen calendars and maps of allergenic pollen in North America. *Aerobiologia*, 35, 613-33. doi: 10.1007/s10453-019-09601-2.
- Lohani N., Singh M.B., Bhalla P.L. (2020) High temperature susceptibility of sexual reproduction in crop plants. *Journal of experimental botany*, 71, 555-68. doi: 10.1093/jxb/erz426.
- Lugonja P., Brdar S., Simović I., Mimić G., Palamarchuk Y., Sofiev M., Šikoparija B. (2019) Integration of in situ and satellite data for top-down mapping of *Ambrosia* infection level. *Remote Sensing of Environment*, 235, 111455. doi: 10.1016/j.rse.2019.111455.
- Maimaitiyiming M., Ghulam A., Tiyp T., Pla F., Latorre-Carmona P., Halik T., Sawut M., Caetano M. (2014) Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89, 59-66. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.12.010.
- Manziona R.L., Castrignanò A. (2019) A geostatistical approach for multi-source data fusion to predict water table depth. *Science of the Total Environment*, 696 doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133763.
- Maragno D., dall'Omo C.F., Ruzzante F., Musco F. (2020) Toward a trans-regional vulnerability assessment for Alps. A methodological approach to land cover changes over alpine landscapes, supporting urban adaptation. *Urban Climate*, 32 doi: 10.1016/j.uclim.2020.100622.
- Martínez-Bracero M., Alcázar P., Velasco-Jiménez M., Galán C. (2019) Fungal spores affecting vineyards in Montilla-Moriles Southern Spain. *European Journal of Plant Pathology*, 153, 1-13. doi: 10.1007/s10658-018-1532-6.
- Martínez-Bracero M., Alcázar P., Díaz de la Guardia, C., González-Minero F.J., Ruiz L., Trigo Pérez M.M., Galán C. (2015) Pollen calendars: a guide to common airborne pollen in Andalusia. *Aerobiologia*, 31, 549-57. doi: 10.1007/s10453-015-9385-3.

- Martínez-Cocera C., Villalón García Á.L., (2003) Pasado, presente y futuro de los recuentos de pólenes de la SEAIC. *Alergol Inmunol Clin*, 18 (Extraordinario Núm 3), 1-4.
- Matricardi P.M., Dramburg S., Alvarez-Perea A., Antolín-Amérigo D., Apfelbacher C., Atanaskovic-Markovic M., Berger U., Blaiss M.S., Blank S., Boni E., Bonini M., Bousquet J., Brockow K., Buters J., Cardona V., Caubet J.-., Cavkaytar Ö, Elliott T., Esteban-Gorgojo I., Fonseca J.A., Gardner J., Gevaert P., Ghiordanescu I., Hellings P., Hoffmann-Sommergruber K., Fusun Kalpaklioglu A., Marmouz F., Meijide Calderón Á, Mösges R., Nakonechna A., Ollert M., Oteros J., Pajno G., Panaitescu C., Perez-Formigo D., Pfaar O., Pitsios C., Rudenko M., Ryan D., Sánchez-García S., Shih J., Tripodi S., Van der Poel, L. -A., van Os-Medendorp H., Varricchi G., Wittmann J., Worm M., Agache I. (2020) The role of mobile health technologies in allergy care: An EAACI position paper. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 75, 259-72. doi: 10.1111/all.13953.
- Maya-Manzano J.M., Sadys M., Tormo-Molina R., Fernández-Rodríguez S., Oteros J., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo A. (2017a) Relationships between airborne pollen grains, wind direction and land cover using GIS and circular statistics. *Science of the Total Environment*, 584-585, 603-13. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.085.
- Maya-Manzano J.M., Fernández-Rodríguez S., Monroy-Colín A., Silva-Palacios I., Tormo-Molina R., Gonzalo-Garijo Á (2017b) Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27, 352-62. doi: 10.1016/j.ufug.2017.09.009.
- Maya Manzano J.M., Tormo Molina R., Fernández Rodríguez S., Silva Palacios I., Gonzalo Garijo Á (2017c) Distribution of ornamental urban trees and their influence on airborne pollen in the SW of Iberian Peninsula. *Landscape and Urban Planning*, 157, 434-46. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.08.011.
- Maya-Manzano J.M., Muñoz-Triviño M., Fernández-Rodríguez S., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo A., Tormo-Molina R. (2016a) Airborne *Alternaria* conidia in Mediterranean rural environments in SW of Iberian Peninsula and weather parameters that influence their seasonality in relation to climate change. *Aerobiologia*, 32, 95-108. doi: 10.1007/s10453-016-9424-8.
- Maya-Manzano J.M., Fernández-Rodríguez S., Smith M., Tormo-Molina R., Reynolds A.M., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo Á, Sadyś M. (2016b) Airborne *Quercus* pollen in SW Spain: Identifying favourable conditions for atmospheric transport and potential source areas. *Science of the Total Environment*, 571, 1037-47. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.094.
- Maya-Manzano J.M., Tormo-Molina R., Fernández-Rodríguez S., Durán-Barroso P., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo Á. (2015) Airborne propagules of *Phytophthora* and related taxa in SW Spain including a predictive model. *European Journal of Plant Pathology*, 143, 473-83. doi: 10.1007/s10658-015-0700-1.
- Mercuri A.M., Torri P., Fornaciari R., Florenzano A. (2016) Plant responses to climate change: The case study of *betulaceae* and *poaceae* pollen seasons (Northern Italy, Vignola, Emilia-Romagna). *Plants*, 5, 1010-20. doi: 10.3390/plants5040042.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es> el 18 de mayo de 2020.

- Monroy-Colín A., Maya-Manzano J.M., Tormo-Molina R., Pecero-Casimiro R., Gonzalo-Garijo M.Á., Fernández-Rodríguez S. (2020) HYSPLIT as an environmental impact assessment tool to study the data discrepancies between *Olea europaea* airborne pollen records and its phenology in SW Spain. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53 doi: 10.1016/j.ufug.2020.126715.
- Montserrat P. (1953) Análisis polínico del aire de Barcelona. II. *Publ. Inst. Biol. Aplicada* 13: 115120.
- Montserrat P. (1951) Análisis polínico del aire de Barcelona. I. *Publ. Inst. Biol. Aplicada* 8: 209221.
- Moreno-Grau S., Aira M.J., Elvira-Rendueles B., Fernández-González M., Fernández-González D., García-Sánchez A., Martínez-García M.J., Moreno J.M., Negral L., Vara A., Rodríguez-Rajo F. (2016) Assessment of the *Olea* pollen and its major allergen Ole e 1 concentrations in the bioaerosol of two biogeographical areas. *Atmos. Environ.* 145, 264–271.
- Muñoz Medina J.M. (1949) Una introducción al estudio de los alérgenos polínicos de Granada. *Real Acad. Med. Granada* 13.
- Navarro A., Colas C., Anton E., Conde J., Dávila I., Dordal M.T., Fernández-Parra B., Ibáñez M.D., Lluch-Benal M., Matheu V., Montoro J., Rondon C., Sánchez M.C., Valero A. (2009) Epidemiology of allergic rhinitis in allergy consultations in Spain: Alergológica-2005. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 19, 339.
- Nilsson, S. (1992). Aerobiology: an interdisciplinary and limitless science. *International Journal of Aerobiology* (Special issue): 23-27.
- Nowak M., Szymanska A., Grewling L. (2012) Allergic risk zones of plane tree pollen (*Platanus* sp.) in Poznan. *Postepy Dermatologii i Alergologii*, 29, 156-60.
- Ochando J., López-Saez J.A., Pérez-Díaz S., Ramos-Fernández J., Munuera M., Fernández S., Galacho-Jiménez F., Luelmo-Lautenschlaeger R., Carrión J. S. (2020) A new pollen sequence from Southern Iberia suggesting coastal Pleistocene phytodiversity hotspot. *Review of Paleobotany and Palynology* 281, 104281.
- O'Connor D.J., Healy D.A., Hellebust S., Buters J.T.M., Sodeau J.R. (2014) Using the WIBS-4 (Waveband Integrated Bioaerosol Sensor) technique for the on-line detection of pollen grains. *Aerosol Science and Technology*, 48, 341-9. doi: 10.1080/02786826.2013.872768.
- Ogren, T. L. (2003). *Safe sex in the garden and other propositions for an allergy-freeworld*. Berkeley, CA: Ten Speed Press.
- Ojeda P.M., Ibáñez M.D., Olaguibel J.M., Sastre J., Chivato T., National Survey of the Spanish Society of Allergology Clinical Immunology Alergologica (2018) Alergológica 2015: A national survey on allergic diseases in the Spanish pediatric population. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 28, 321-9. doi: 10.18176/jiaci.0308.
- Olsen Y., Skjøth C.A., Hertel O., Rasmussen K., Sigsgaard T., Gosewinkel U. (2020) Airborne *Cladosporium* and *Alternaria* spore concentrations through 26 years in Copenhagen, Denmark. *Aerobiología*, 36, 141-57. doi: 10.1007/s10453-019-09618-7.

- Organización Mundial de la Salud (2016a) Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks. World Health Organization.
- Organización Mundial de la Salud (2016b) Urban green spaces and health: A review of evidence. World Health Organization: Copenhagen, Denmark, 2016.
- Oteros J., Bergmann K.-., Menzel A., Damialis A., Traidl-Hoffmann C., Schmidt-Weber C.B., Buters J. (2019a) Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmospheric Environment*, 199, 435-42. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.11.045.
- Oteros J., Sofiev M., Smith M., Clot B., Damialis A., Prank M., Werchan M., Wachter R., Weber A., Kutzora S., Heinze S., Herr C.E.W., Menzel A., Bergmann K.-., Traidl-Hoffmann C., Schmidt-Weber C.B., Buters J.T.M. (2019b) Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): Selection of optimal sites by clustering pollen stations. *Science of the Total Environment*, 688, 1263-74. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.131.
- Oteros J., Valencia R.M., del Río S., Vega A.M., García-Mozo H., Galán C., Gutiérrez P., Mandrioli P., Fernández-González D. (2017) Concentric Ring Method for generating pollen maps. *Quercus* as case study. *Science of the Total Environment*, 576, 637-45. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.121.
- Oteros J., Pusch G., Weichenmeier I., Heimann U., Möller R., Röseler S., Traidl-Hoffmann C., Schmidt-Weber C., Buters J.T.M. (2015) Automatic and online pollen monitoring. *International Archives of Allergy and Immunology*, 167, 158-66. doi: 10.1159/000436968.
- Oteros J., Orlandi F., García-Mozo H., Aguilera F., Dhiab A.B., Bonofiglio T., Abichou M., Ruiz-Valenzuela L., Del Trigo M.M., Díaz De La Guardia, C., Domínguez-Vilches E., Msallem M., Fornaciari M., Galán C. (2014) Better prediction of Mediterranean olive production using pollen-based models. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 685-94. doi: 10.1007/s13593-013-0198-x.
- Pauleit S., Duhme F. (2000) GIS assessment of Munich's urban forest structure for urban planning. *Journal of Arboriculture*, 26, 133-41.
- Pawankar R. (2014) Allergic diseases and asthma: A global public health concern and a call to action. *World Allergy Organization Journal*, 7 doi: 10.1186/1939-4551-7-12.
- Pathirane L. (1975) Aerobiological literature in scientific periodicals. *Grana*, 15:145-147.
- Pecero-Casimiro R., Fernández-Rodríguez S., Tormo-Molina R., Silva-Palacios I., Gonzalo-Garijo A., Monroy-Colín A., Coloma J.F., Maya-Manzano J.M. (2020a) Producing urban aerobiological risk map for cupressaceae family in the SW iberian peninsula from LiDAR technology. *Remote Sensing*, 12 doi: 10.3390/rs12101562.
- Pecero-Casimiro R., Maya-Manzano J.M., Fernández-Rodríguez S., Tormo-Molina R., Silva-Palacios I., Monroy-Colín A. & Gonzalo-Garijo A. (2020b) Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain). *Aerobiología*, (2020). <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09667-3>.

- Pecero-Casimiro R., Fernández-Rodríguez S., Tormo-Molina R., Monroy-Colín A., Silva-Palacios I., Cortés-Pérez J.P., Gonzalo-Garijo Á., Maya-Manzano J.M. (2019) Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees. *Sci. Total Environ*, 2019, 693, 133576, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.382.
- Pérez-Badia R., Rapp A., Vaquero C., Fernández-González F. (2011) Aerobiological study in east-central iberian peninsula: Pollen diversity and dynamics for major taxa. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18, 99-111.
- Pérez-Badia R., Rapp A., Morales C., Sardinero S., Galán C., García-Mozo H. (2010) Pollen spectrum and risk of pollen allergy in central Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 17, 139-51.
- Picornell A., Oteros J., Trigo M.M., Gharbi D., Docampo Fernández S., Melgar Caballero M., Toro F.J., García-Sánchez J., Ruiz-Mata R., Cabezudo B., Recio M. (2019) Increasing resolution of airborne pollen forecasting at a discrete sampled area in the southwest Mediterranean Basin. *Chemosphere*, 234, 668-81. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.019.
- PLATERCAEX (2006) Plan Territorial de Protección Civil de la Comunidad Autónoma de Extremadura. Junta de Extremadura. Recuperado de http://www.juntaex.es/filescms/ddgg004/uploaded_files/ProteccionCivil/PLATERCAEX.pdf el 27 de mayo de 2020.
- Plaza M.P., Alcázar P., Oteros J., Galán C. (2020) Atmospheric pollutants and their association with olive and grass aeroallergen concentrations in Córdoba (Spain). *Environmental Science and Pollution Research* doi: 10.1007/s11356-020-10422-x.
- PNACC-2 (2020) Segundo Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, previsto para el periodo 2021-2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es> el 15 de mayo de 2020.
- Pomés A., Villalba M. (2007) Alérgenos. In: Peláez, A., Dávila, I.J. (Eds). *Tratado de Alergología*. Sociedad Española de Alergología e inmunología clínica (SEAIC). Ed. Ergón. Madrid. 1: 3-26. ISBN: 978-84-8473-576-2.
- Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.85. Recuperado de <http://www.python.org> el 01 de septiembre de 2020.
- Pyrri I., Zoma A., Barmpareos N., Assimakopoulos M.N., Assimakopoulos V.D., Kapsanaki-Gotsi E. (2020) Impact of a green roof system on indoor fungal aerosol in a primary school in Greece. *Science of the Total Environment*, 719 doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137447.
- Quirce S. (2009) Asthma in Alergológica-2005. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 19, 14-20.
- R Core Team (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria.
- Rahmawaty, Marpaung R.M.E., Rauf A., Batubara R. (2020) Integrated GIS and GPS for mapping of land suitability for Multy Purpose Tree Species (*Persea americana*) at community agroforestry land in Peria-ria Village. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 454, 12146. doi: 10.1088/1755-1315/454/1/012146.

- Reagan J.A., Herman B.M. (2017) Bistatic LiDAR: A tool for characterizing atmospheric particulates. *Alternative Energy Sources: Proceedings of the Miami International Congress on Energy and the Environment*, 1, 34-45.
- Recio M., Picornell A., Trigo M.M., Gharbi D., García-Sánchez J., Cabezudo B. (2018) Intensity and temporality of airborne *Quercus* pollen in the southwest Mediterranean area: Correlation with meteorological and phenoclimatic variables, trends and possible adaptation to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 308-18. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.11.028.
- Ribeiro H., Abreu I. (2014) A 10-year survey of allergenic airborne pollen in the city of Porto (Portugal). *Aerobiologia*, 30, 333-44. doi: 10.1007/s10453-014-9331-9.
- Rodríguez De La Cruz, D., Sánchez-Reyes E., Sánchez-Sánchez J. (2012) Analysis of Chenopodiaceae-Amaranthaceae airborne pollen in Salamanca, Spain. *Turkish Journal of Botany*, 36, 336-43. doi: 10.3906/bot-1105-17.
- Rodríguez-de la Cruz D., Sánchez-Reyes E., Dávila-González I., Lorente-Toledano F., Sánchez-Sánchez J. (2010) Airborne pollen calendar of Salamanca, Spain, 2000–2007. *Allergology and Immunopathology (Allergologia et Immunopathologia)*, 38, 307-12. doi: 10.1016/j.aller.2010.04.001.
- Rogers C.A. (1997) An aeropalynological study of metropolitan Toronto. *Aerobiología*, 13, 243-257.
- Rohde R.A., Muller R.A. (2015) Air pollution in China: Mapping of concentrations and sources. *PLoS ONE*, 10 doi: 10.1371/journal.pone.0135749.
- Rojo J., Oteros J., Picornell A., Ruëff F., Werchan B., Werchan M., Bergmann K., Schmidt-Weber C.B., Buters J. (2020) Land-Use and Height of Pollen Sampling Affect Pollen Exposure in Munich, Germany. *Atmosphere*, 2020, 145. doi: 10.3390/atmos11020145.
- Rojo J., Picornell A., Oteros J. (2019) AeRobiology: The computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1371-6. doi: 10.1111/2041-210X.13203.
- Rojo J., Rivero R., Romero-Morte J., Fernández-González F., Pérez-Badía R. (2017) Modeling pollen time series using seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS smoothing. *International journal of biometeorology*, 61, 335-48. doi: 10.1007/s00484-016-1215-y.
- Rojo J., Orlandi F., Pérez-Badía R., Aguilera F., Ben Dhiab A., Bouziane H., Días de la Guardia C., Galán C., Gutiérrez-Bustillo A.M., Moreno-Grau S., Msallem M., Trigo M.M., Fornaciari. (2016) Modeling olive pollen intensity in the Mediterranean region through análisis of emisión sources. *Sci. Total Environ.* 551-552, 73–82.
- Rojo J., Rapp A., Lara B., Fernández-González F., Pérez-Badía R. (2015a) Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Science of the Total Environment*, 538, 672-82. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.074.

- Rojo J., Pérez-Badía R. (2015b) Spatiotemporal analysis of olive flowering using geostatistical techniques. *Science of the Total Environment*, 505, 860-9. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.10.022.
- Rodán P.N. (2017) Estadística. Recuperado de <https://economipedia.com> el 25 de mayo de 2020.
- Ruga L., Orlandi F., Fornaciari M. (2019) Preventive conservation of cultural heritage: Biodeteriogens control by aerobiological monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 19 doi: 10.3390/s19173647.
- Salmond J.A., Tadaki M., Vardoulakis S., Arbuthnott K., Coutts A., Demuzere M., Dirks K.N., Heaviside C., Lim S., MacIntyre H., McInnes R.N., Wheeler B.W. (2016) Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 15 doi: 10.1186/s12940-016-0103-6.
- Salo M.J., Marik T., Mikkola R., Andersson M.A., Kredics L., Salonen H., Kurnitski J. (2019) *Penicillium expansum* strain isolated from indoor building material was able to grow on gypsum board and emitted guttation droplets containing chaetoglobosins and communesins A, B and D. *Journal of Applied Microbiology*, 127, 1135-47. doi: 10.1111/jam.14369.
- Šaulienė I., Šukienė L., Daunys G., Valiulis G., Vaitkevičius L., Matavulj P., Brdar S., Panic M., Sikoparija B., Clot B., Crouzy B., Sofiev M. (2019) Automatic pollen recognition with the Rapid-E particle counter: the first-level procedure, experience and next steps. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 3435-52. doi: 10.5194/amt-12-3435-2019.
- Sauvageat E., Zeder Y., Auderset K., Calpini B., Clot B., Crouzy B., Konzelmann T., Lieberherr G., Tummon F., Vasilatou K. (2020) Real-time pollen monitoring using digital holography. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 1539-50. doi: 10.5194/amt-13-1539-2020.
- Scheifinger H., Menzel A., Koch E., Peter C., Ahas R. (2002) Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of. *International Journal of Climatology*, 22, 1739-55. doi: 10.1002/joc.817.
- Schulz C., Knopf P., Stützel T. (2005) Identification key to the Cypress family (Cupressaceae). *Feddes Repertorium*, 116, 96-146. doi: 10.1002/fedr.200411062.
- SEAIC. (2019). Sociedad Española de Alergología e Inmunología Clínica. Recuperado de <https://www.polenes.com> el 04 de abril de 2020.
- SEAIC. (2017). Alergológica 2015. Recuperado de <http://www.seaic.org> el 22 de diciembre de 2019.
- Sénéchal H., Visez N., Charpin D., Shahali Y., Peltre G., Biolley J.-., Lhuissier F., Couderc R., Yamada O., Malrat-Domenge A., Pham-Thi N., Poncet P., Sutra J.-. (2015) A review of the effects of major atmospheric pollutants on pollen grains, pollen content, and allergenicity. *Scientific World Journal*, 2015 doi: 10.1155/2015/940243.
- Sharma C.M., Khanduri V.P., Ghildiyal S.K. (2012). Reproductive ecology of male and female strobili and mating system in two different populations of *Pinus roxburghii*. *Sci. World J.*, 2012, 271389, <https://doi.org/10.1100/2012/271389>.

- Sicard M., Jorba O., Izquierdo R., Alarcón M., Belmonte J., Comerón A., De Linares C., Baldasano J.M. (2018) First forecasts of airborne platanus and Pinus pollen in Catalonia, NE Spain: Use of a ground-based LiDAR to estimate the model score. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2018-July, 6037-40. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8517870.
- SIGEO (2010) Sistema de Información Geológico Minero de Extremadura. Junta de Extremadura. Recuperado de <http://sigeo.juntaex.es/portalsigeo/web/guest/geologia-de-extremadura> el 27 de mayo de 2020.
- Škoparija B., Marko O., Panic M., Jakovetic D., Radišić P. (2018) How to prepare a pollen calendar for forecasting daily pollen concentrations of Ambrosia, Betula and Poaceae?. *Aerobiologia*, 34, 203-17. doi: 10.1007/s10453-018-9507-9.
- Silva-Palacios I., Fernández-Rodríguez S., Durán-Barroso P., Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M., Gonzalo-Garijo Á (2016) Temporal modelling and forecasting of the airborne pollen of Cupressaceae on the southwestern Iberian Peninsula. *International journal of biometeorology*, 60, 297-306. doi: 10.1007/s00484-015-1026-6.
- Silva Palacios I., Tormo Molina R., Muñoz Rodríguez A. (2007) The importance of interactions between meteorological conditions when interpreting their effect on the dispersal of pollen from homogeneously distributed sources. *Aerobiologia*, 23, 17-26. doi: 10.1007/s10453-006-9041-z.
- Singh N., Singh U., Singh D., Daya M., Singh V. (2017) Correlation of pollen counts and number of hospital visits of asthmatic and allergic rhinitis patients. *Lung India*, 34, 127-31. doi: 10.4103/0970-2113.201313.
- Skjøth C.A., Baker P., Sadyś M., Adams-Groom B. (2015) Pollen from alder (*Alnus* sp.), birch (*Betula* sp.) and oak (*Quercus* sp.) in the UK originate from small woodlands. *Urban Climate*, 14, 414-28. doi: 10.1016/j.uclim.2014.09.007.
- Skjøth C.A., Geels C., Hvidberg M., Hertel O., Brandt J., Frohn L.M., Hansen K.M., Hedegaard G.B., Christensen J.H., Moseholm L. (2008) An inventory of tree species in Europe—An essential data input for air pollution modelling. *Ecological Modelling*, 217, 292-304. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.06.023.
- Smith M., Jäger S., Berger U., Škoparija B., Hallsdóttir M., Sauliene I., Bergmann K.C., Pashley C.H., De Weger L., Majkowska-Wojciechowska B., Rybníček O., Thibaudon M., Gehrig R., Bonini M., Yankova R., Damialis A., Vokou D., Gutiérrez Bustillo A.M., Hoffmann-Sommergruber K., Van Ree R. (2014) Geographic and temporal variations in pollen exposure across Europe. *Allergy Eur J Allergy Clin Immunol* 69(7):913–923
- Sompornrattanaphan M., Thongngarm T., Ratanawatkul P., Wongsas C., Swigris J.J. (2020) The contribution of particulate matter to respiratory allergy. *Asian Pacific journal of allergy and immunology*, 38, 19-28. doi: 10.12932/AP-100619-0579.
- Stinson K.A., Albertine J.M., Hancock L.M.S., Seidler T.G., Rogers C.A. (2016) Northern ragweed ecotypes flower earlier and longer in response to elevated CO₂: what are you sneezing at?. *Oecologia*, 182, 587-94. doi: 10.1007/s00442-016-3670-x.

- Subiza Martín E. (1980) Incidencia de granos de polen en la atmósfera de Madrid. Metodo volumétrico. *Allergol. Immunopathol. suppl.* 7: 261-276.
- Sung M., Kim S.W., Kim J.H., Lim D.H. (2017) Regional Difference of Causative Pollen in Children with Allergic Rhinitis. *Journal of Korean medical science*, 32, 926-32. doi: 10.3346/jkms.2017.32.6.926.
- Talhok S.N., Fabian M., Dagher R. (2015) Landscape Plant Database. Department of Landscape Design & Ecosystem Management, American University of Beirut, 2019.
- The European Academy of Allergy and Clinical Immunology (EAACI) (2016). A European Declaration on Allergen Immunotherapy. Recuperado de <http://www.eaaci.org/resources/immunotherapy-declaration.html> el 08 de abril de 2020.
- Thompson R.S. (1993) Building amplification factors for sources near buildings: A wind-tunnel study. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 27, 2313-25. doi: 10.1016/0960-1686(93)90400-S.
- Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.M., Silva-Palacios I., Fernández-Rodríguez S., Gonzalo-Garijo A. (2016) Guía botánica del campus de Badajoz de la Universidad de Extremadura. I.S.B.N.: 978-84-608-7477-5.
- Tormo-Molina R., Maya-Manzano J.-., Silva-Palacios I., Fernández-Rodríguez S., Gonzalo-Garijo Á. (2015) Flower production and phenology in *Dactylis glomerata*. *Aerobiologia*, 31, 469-79. doi: 10.1007/s10453-015-9381-7.
- Tormo-Molina R. (2014) Plantas y hongos. Recuperado de <http://www.plantasyhongos.es> el 09 de junio de 2020.
- Tormo Molina R., Maya Manzano J.M., Fernández Rodríguez S., Gonzalo Garijo Á, Silva Palacios I. (2013) Influence of environmental factors on measurements with Hirst spore traps. *Grana*, 52, 59-70. doi: 10.1080/00173134.2012.718359.
- Tormo-Molina R., Gonzalo-Garijo M.A., Fernández-Rodríguez S., Silva-Palacios I. (2012) Monitoring the occurrence of indoor fungi in a hospital. *Revista Iberoamericana de Micología*, 29, 227-34. doi: 10.1016/j.riam.2012.04.002.
- Tormo-Molina R., Gonzalo-Garijo M.A., Silva-Palacios I., Muñoz-Rodríguez A.F. (2010) General trends in airborne pollen production and pollination periods at a mediterranean site (Badajoz, southwest Spain). *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 20, 567-74.
- Tormo-Molina R. (2000) Plantas en Extremadura. Recuperado de <https://www.eweb.unex.es/eweb/botanica/plantaex/plantaex.htm> el 27 de mayo de 2020.
- Tormo-Molina R., Rodríguez A.M., Silva-Palacios I., López F.G. (1996) Pollen production in anemophilous trees. *Grana*, 35, 38-46. doi: 10.1080/00173139609430499.
- Traidl-Hoffmann C., Kasche A., Jakob T., Huger M., Plötz S., Feussner I., Ring J., Behrendt H. (2002) Lipid mediators from pollen act as chemoattractants and activators of polymorphonuclear granulocytes. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 109, 831-8. doi: 10.1067/mai.2002.124655.

- Universidad de Córdoba. La Aerobiología. Recuperado de <http://www.uco.es/aerobiologia/aerobiologia/aerobiologia.html> el 08 de junio de 2020.
- Valero AL. & Picado C. (2002). Polinosis. En: Polinosis. Polen y Alergia. MRA Ediciones SL. Barcelona, pp 17-21.
- Venter C., Greenhawt M., Meyer R.W., Agostoni C., Reese I., du Toit G., Feeney M., Maslin K., Nwaru B.I., Roduit C., Untersmayr E., Vlieg-Boerstra B., Pali-Schöll I., Roberts G.C., Smith P., Akdis C.A., Agache I., Ben-Adallah M., Bischoff S., Frei R., Garn H., Grimshaw K., Hoffmann-Sommergruber K., Lunjani N., Muraro A., Poulsen L.K., Renz H., Sokolowska M., Stanton C., O'Mahony L. (2020) EAACI position paper on diet diversity in pregnancy, infancy and childhood: Novel concepts and implications for studies in allergy and asthma. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 75, 497-523. doi: 10.1111/all.14051.
- Vieitez Cortizo E. (1945) Polen y clima en Santiago de Compostela. *Anales Jard. Bot. Madrid* 6: 159-171.
- Vojtkova H., Simonovicova A., Cernansky S. (2020) *Neurospora sitophila* in indoor environment of buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 444 doi: 10.1088/1755-1315/444/1/012055.
- Waldbott G.L., Blair K.E., Ackley A.B. (1941) An evaluation of the importance of fungi in respiratory allergy. *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 26, 1593-9.
- Wang H., Zhong S., Tao Z., Dai J., Ge Q. (2019) Changes in flowering phenology of woody plants from 1963 to 2014 in North China. *International Journal of Biometeorology*, 63, 579-90. doi: 10.1007/s00484-017-1377-2.
- Wang Q., Nakamura S., Lu S., Nakajima D., Suzuki M., Sekiguchi K., Miwa M. (2013) Diurnal and nocturnal behaviour of airborne *Cryptomeria japonica* pollen grains and the allergenic species in urban atmosphere of Saitama, Japan. *Asian J Atmos Environ* 7(2):65–71
- Wayne P., Foster S., Connolly J., Bazzaz F., Epstein P. (2002) Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂-enriched atmospheres. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 88, 279-82. doi: 10.1016/S1081-1206(10)62009-1.
- Weber R.W. (2013) Allergen of the Month - Oriental Plane Tree. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 111 doi: 10.1016/j.anai.2013.08.008.
- YellowScan (2020) Recuperado de <https://www.yellowscan-lidar.com/es/knowledge/how-lidar-works/> el 09 de junio de 2020.
- Zeiss, C.R. (2011). Respuestas inmunes mediadas por IgE y otras respuestas de hipersensibilidad. In: Grammer, L.C. Greenberger, P.A. (eds.) *Patterson Enfermedades alérgicas*. 7º ed. Ed. Aula Médica, Madrid, 2:23.
- Zhang C., Zou Z., Chang Y., Zhang Y., Wang X., Yang X. (2020) Source assessment of atmospheric fine particulate matter in a Chinese megacity: Insights from long-term, high-time resolution chemical composition measurements from Shanghai flagship monitoring supersite. *Chemosphere*, 251 doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126598.

Ziello C., Sparks T.H., Estrella N., Belmonte J., Bergmann K.C., Bucher E., Brighetti M.A., Damialis A., Detandt M., Galán C., Gehrig R., Grewling L., Gutiérrez Bustillo A.M., Hallsdóttir M., Kockhans-Bieda M., De Linares C., Myszkowska D., Pàldy A., Sánchez A., Smith M., Thibaudon M., Travaglini A., Uruska A., Valencia-Barrera R.M., Vokou D., Wachter R., de Weger L.A., Menzel A. (2012) Changes to Airborne Pollen Counts across Europe. *PloS one*, 7, e34076. doi: 10.1371/journal.pone.0034076.

9

ANEXO



9. Anexo

9.1. Índice de figuras

Figure 1. Graphical abstract of the Doctoral Thesis.	20
Figura 2. Esquema de algunas de las disciplinas relacionadas con la Aerobiología.	27
Figura 3. Imágenes de las hojas y frutos de <i>Quercus ilex</i> (imagen izquierda), de las hojas y flores de <i>Quercus suber</i> (imagen central) y de las hojas y frutos de <i>Quercus robur</i> (imagen derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.	40
Figura 4. Imágenes de algunas especies pertenecientes a la familia de las Poaceae. <i>Triticum aestivum</i> L. (imagen izquierda), <i>Panicum miliaceum</i> L. (imagen central) y <i>Saccharum officinarum</i> L. (imagen de la derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.	40
Figura 5. Imágenes del árbol (imagen izquierda), de la flor (imagen central) y del fruto (imagen derecha) de <i>Olea europaea</i> . Fuente: Tormo-Molina 2014.	41
Figura 6. Hojas de <i>Cupressus sempervirens</i> (imagen izquierda) y <i>Platycladus orientalis</i> (imagen derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.	42
Figura 7. Hojas de <i>Platanus hispanica</i> (imagen izquierda) y <i>Platanus orientalis</i> (imagen derecha). Fuente: Tormo-Molina 2014.	43
Figura 8. Calendario polínico de los principales tipos recogidos en Badajoz y Cáceres. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2020b).	45
Figura 9. Esquema de funcionamiento de LiDAR (imagen izquierda) y levantamiento de la ciudad de Don Benito a partir de puntos LiDAR (Imagen derecha). Fuentes: https://www.yellowscanlidar.com/es/knowledge/how-lidar-works ; Pecero-Casimiro et al. (2019).	48
Figura 10. Mapa de Extremadura en la Península Ibérica y ubicación de las ciudades estudiadas. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2020b).	58
Figura 11. Resumen gráfico de la metodología del Capítulo I.	66
Figura 12. Resumen gráfico de la metodología del Capítulo II. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2019).	66
Figura 13. Resumen gráfico de la metodología del Capítulo III. Fuente: Pecero-Casimiro et al. (2020a).	67
Figura 14. Mapa de Extremadura donde se localizan y representan las ciudades de Badajoz (BA), Cáceres (CC), Don Benito (DB), Plasencia (PL) y Zafra (ZA) por gradientes de colores que muestran el número de tipos polínicos de cada ciudad cuyo API _n (Annual Pollen Integral) es ≥ 100 granos de pollen*día/m ³ . También se localizan para cada ciudad su correspondiente calendario	

polínico y algunos de sus mapas de riesgo aerobiológico obtenidos a partir de AIROT y representados mediante gradientes locales por colores.70

9.2. Índice de Tablas

Tabla 1. Número de ejemplares identificados y georreferenciados de los taxones utilizados para los Capítulos II y III en cada ciudad de estudio.64

Tabla 2. Coordenadas GMS de los captadores volumétricos en las ciudades de estudio.64

9.3. Material suplementario

Capítulo II

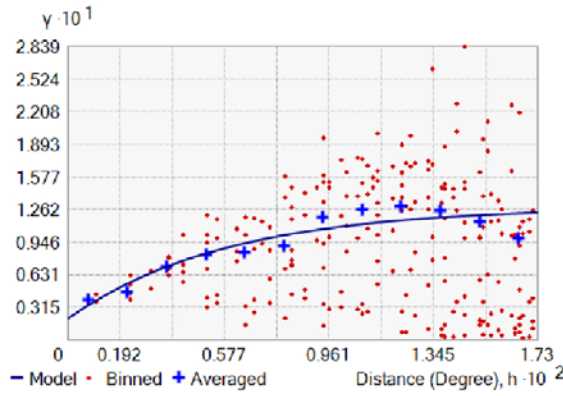
Supplementary materials.

Table s1: Results of the AIROT index for higher values within the cities.

City	Name of Street (type of urban environment)	AIROT index
Badajoz	Calle Jesús Delgado Valhondo (park)	1.00
	Calle Retama (park)	0.86
	Calle Santa María de la Cabeza (park)	0.86
	Calle Jacobo Rodríguez Pereira (wide avenue with landscaped garden)	0.80
	Avenida Condes de Barcelona (wide avenues with landscaped garden)	0.71
	Avenida Jaime Montero de Espinosa (boulevard with landscaped garden)	0.71
Cáceres	Calle Isla de la Gomera (boulevard with landscaped garden)	0.89
	Calle Isla de la Palma (boulevard)	0.80
	Calle Islas canarias (boulevard with landscaped garden)	0.78
	Calle Osa Mayor (park)	0.67
	Calle Islas Filipinas (boulevard with landscaped garden)	0.67
	Calle Isla de Córcega (boulevard)	0.67
Don Benito	Avda. Alonso Martín (wide avenue with landscaped garden)	1.00
	Plaza J. Sánchez-Cortés (square)	1.00
	Plaza de Extremadura (square)	0.80
	Paseo de Feval (park)	0.75
	Patio interior de Feval (park)	0.50
Plasencia	Juan Loaisa (square)	1.00
	Parque de la Coronación (park)	0.57
	Avda. de Portugal (wide avenue)	0.34
	Parque La Mezuela (park)	0.29
	Avenida Juan Carlos I (boulevard with landscaped garden)	0.26
Zafra	Ctra. Badajoz Granada (N-432) (wide avenue with landscaped garden)	1.00
	Plaza Carlos V (square)	0.49
	C. Alhambra (square)	0.28
	Avda. Antonio Chacón (wide avenue with landscaped garden)	0.17
	Parque Plaza de Toros (park)	0.14

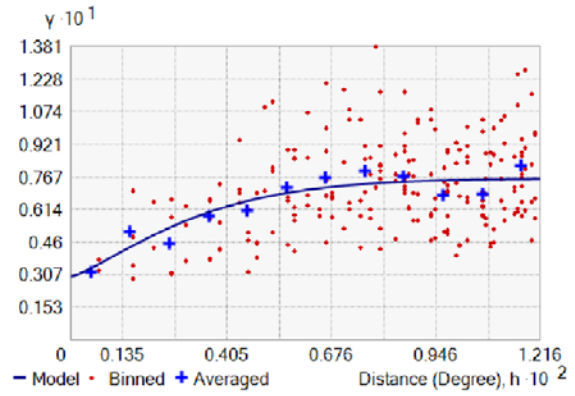
Fig. S1: Semiovariograms for each studied city.

Don Benito:



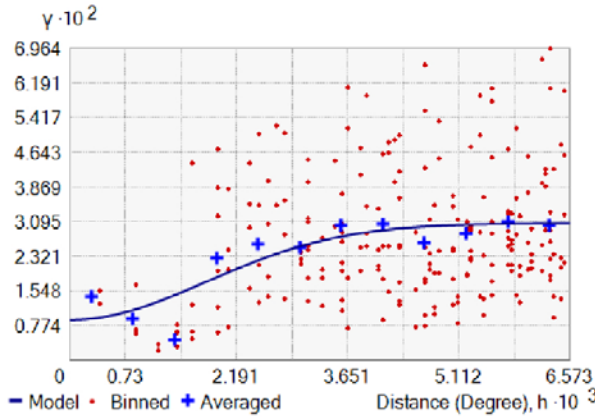
$$0.020398 * \text{Nugget} + 0.10803 * \text{Exponential} (0.017297)$$

Badajoz:



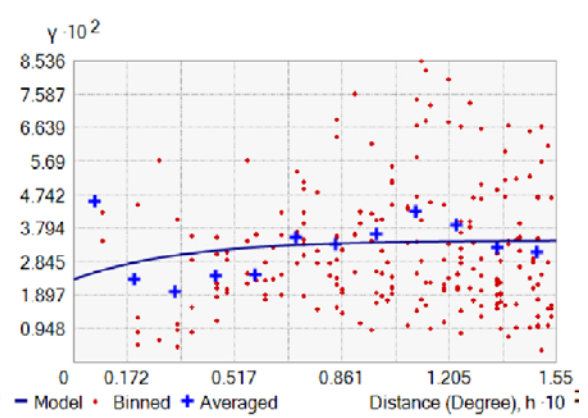
$$0.029695 * \text{Nugget} + 0.046386 * \text{Stable} (0.0079651, 1.2916)$$

Plasencia:



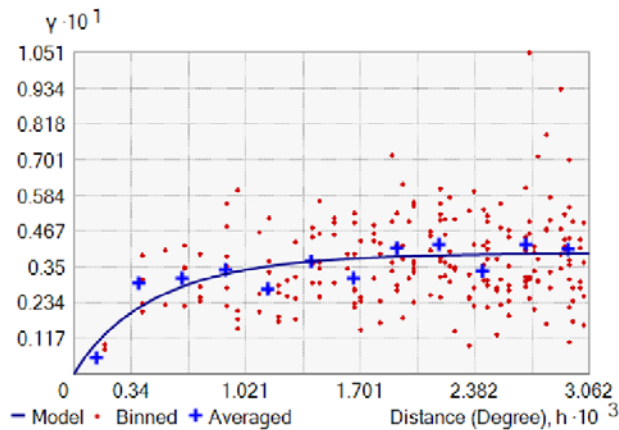
$$0.0090482 * \text{Nugget} + 0.021535 * \text{Stable} (0.0043817, 2)$$

Zafra:



$$0.023457 * \text{Nugget} + 0.01112 * \text{Exponential} (0.01033)$$

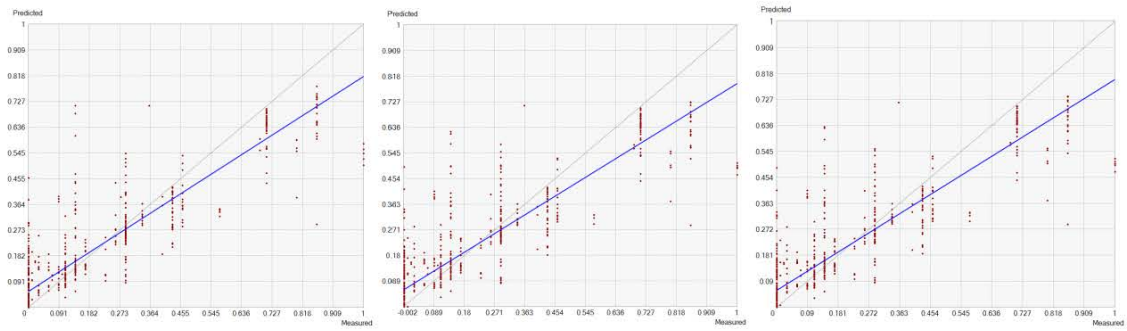
Cáceres:



$$0 * \text{Nugget} + 0.039565 * \text{Stable} (0.0016025, 0.92949)$$

Fig. S2: Results for the cross-validation test.

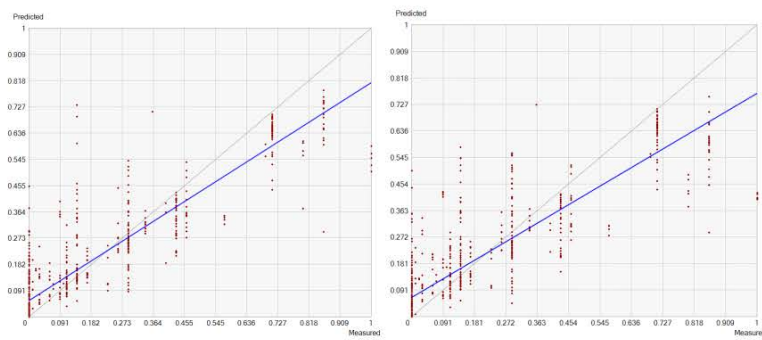
BADAJOS



Stable

Circular

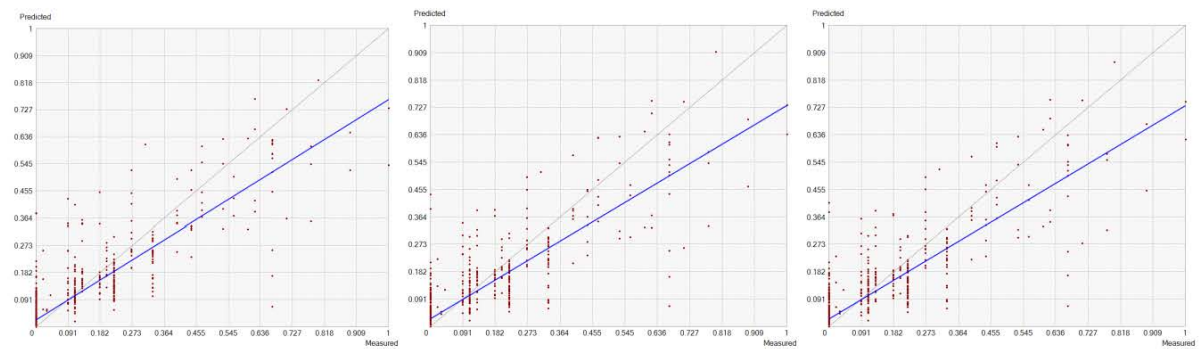
Spherical



Exponential

Gaussian

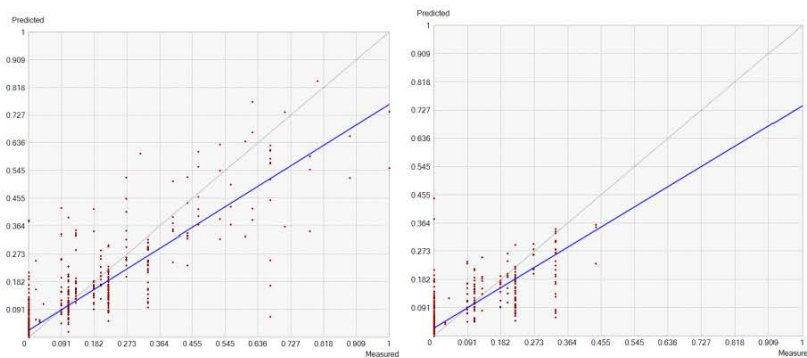
CÁCERES



Stable

Circular

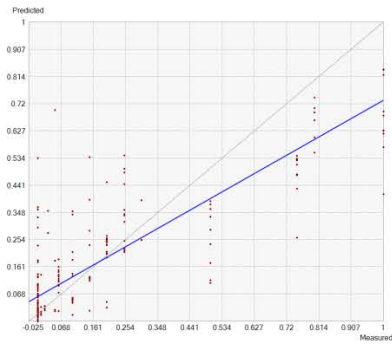
Spherical



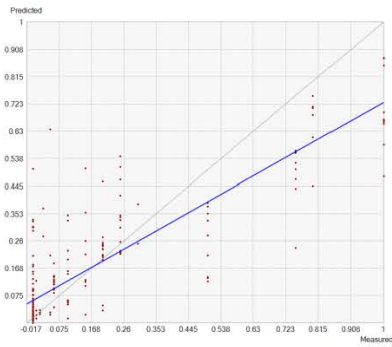
Exponential

Gaussian

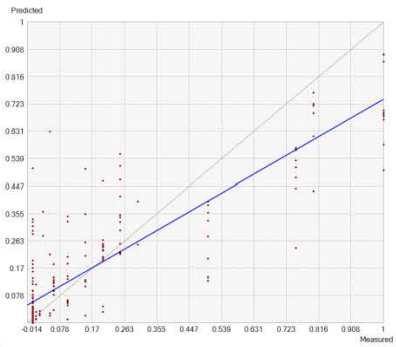
DON BENITO



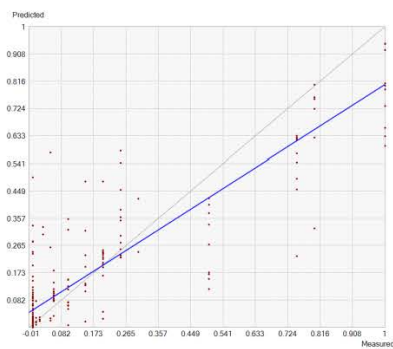
Stable



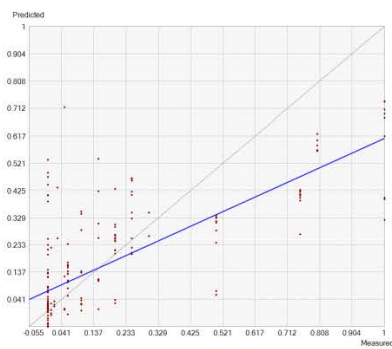
Circular



Spherical

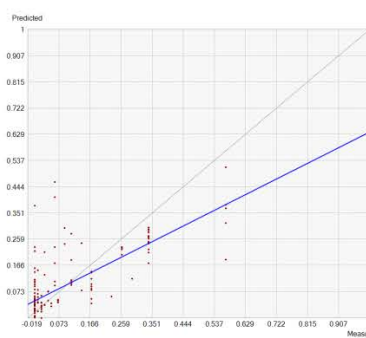


Exponential

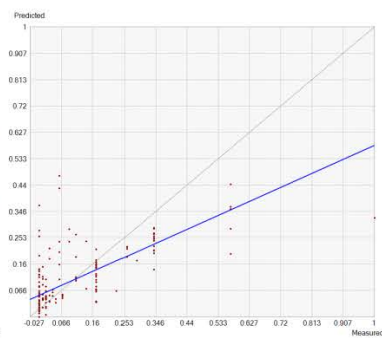


Gaussian

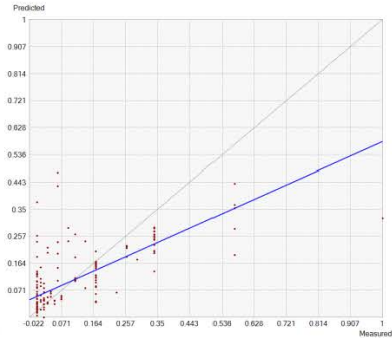
PLASENCIA



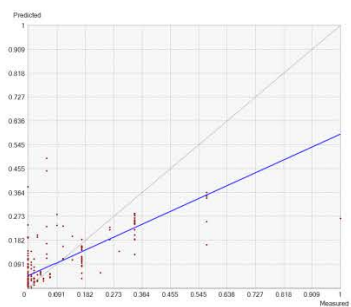
Stable



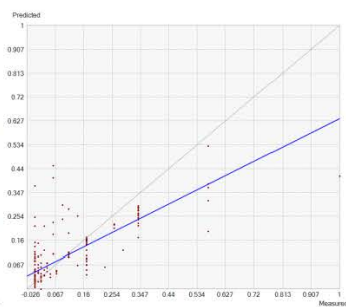
Circular



Spherical

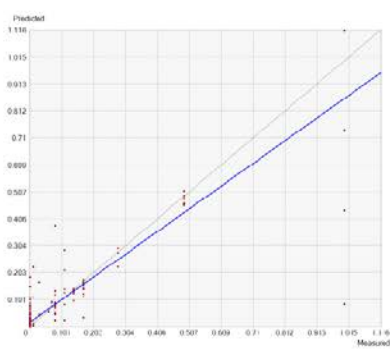


Exponential

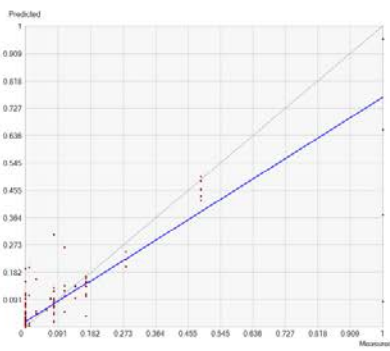


Gaussian

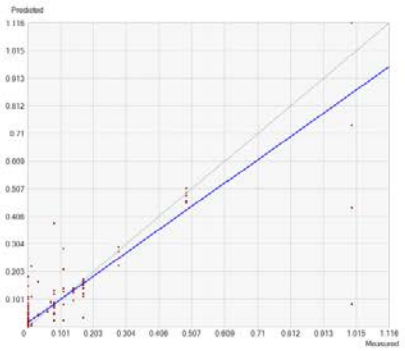
ZAFRA



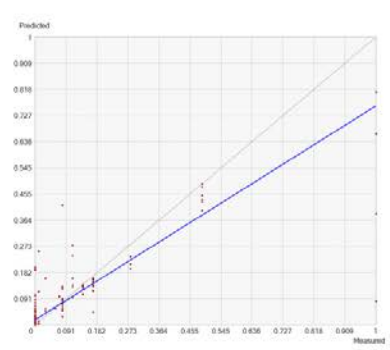
Stable



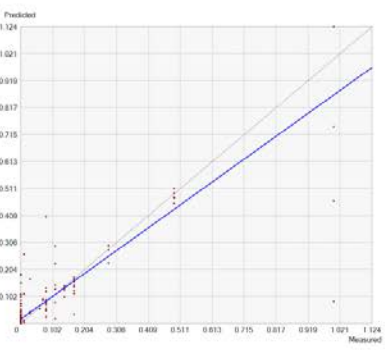
Circular



Spherical

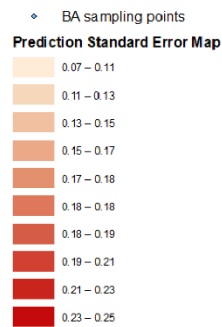
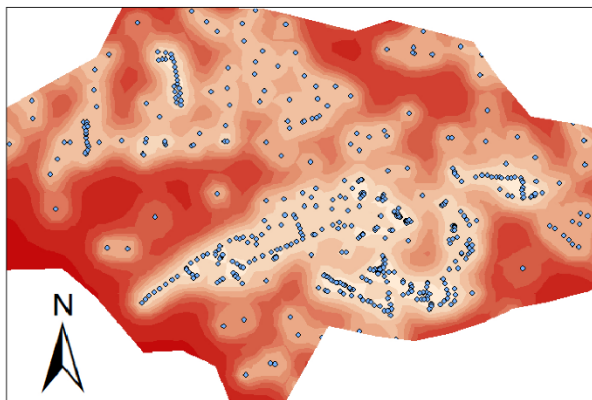


Exponential

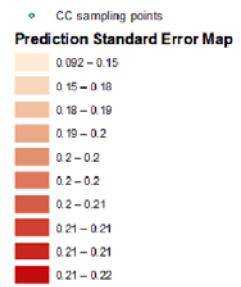
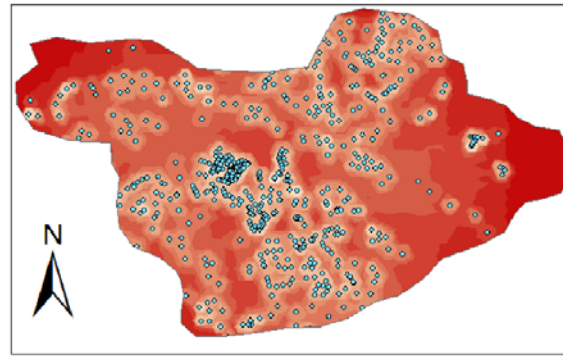


Gaussian

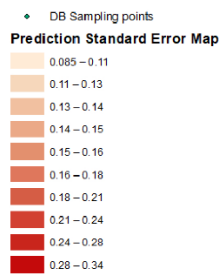
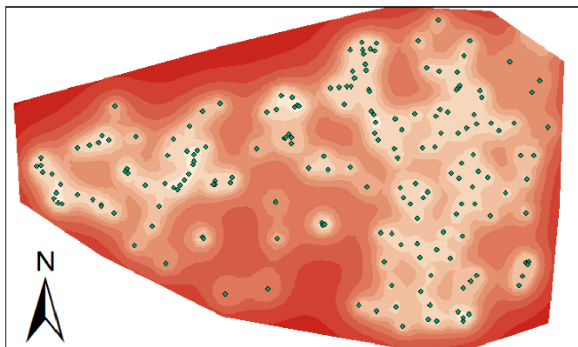
Prediction Standard Error Map for Badajoz



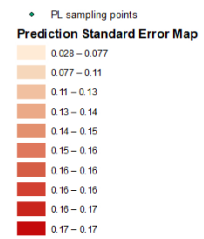
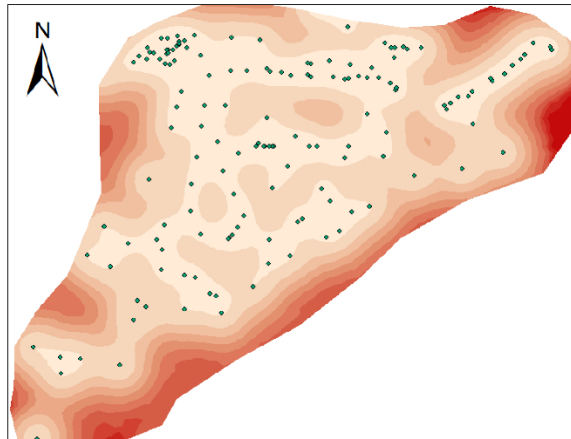
Prediction Standard Error Map for Cáceres



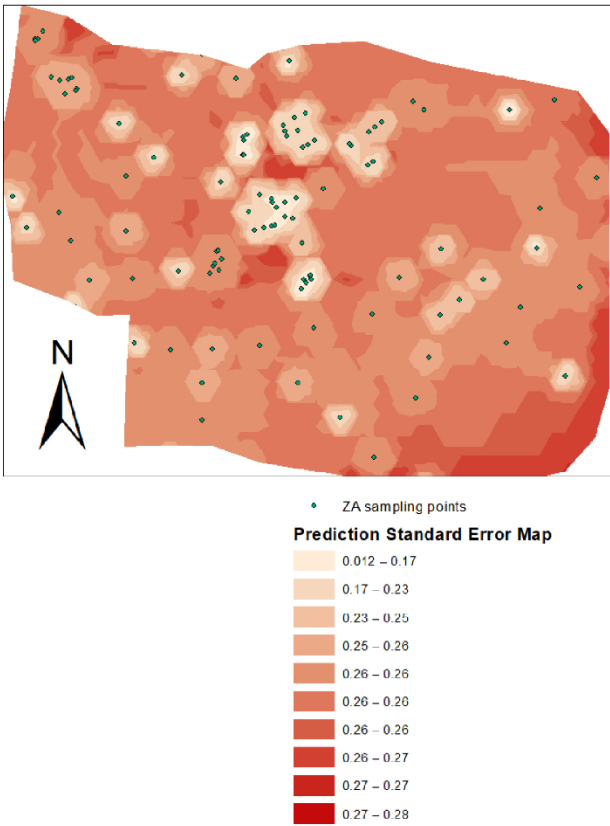
Prediction Standard Error Map for Don Benito



Prediction Standard Error Map for Plasencia



Prediction Standard Error Map for Zafra



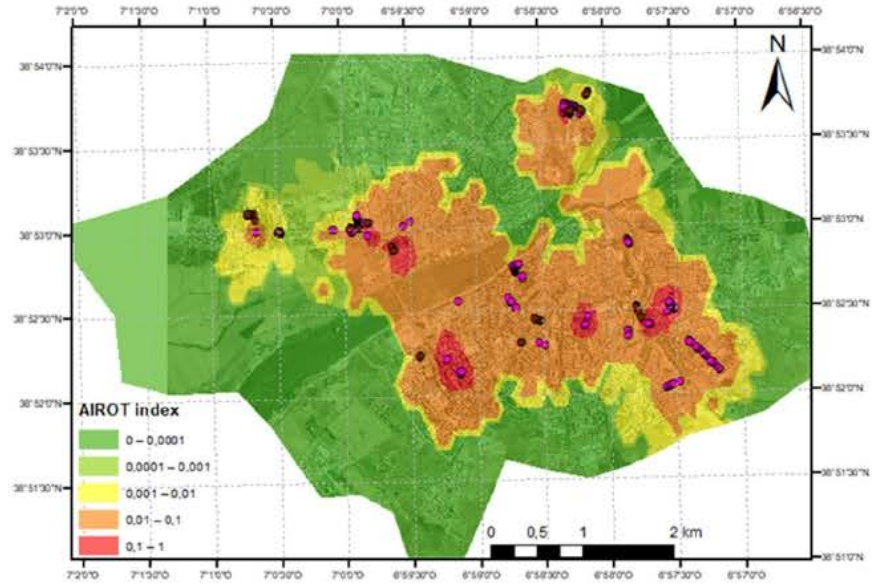
Capítulo III

Supplementary Materials

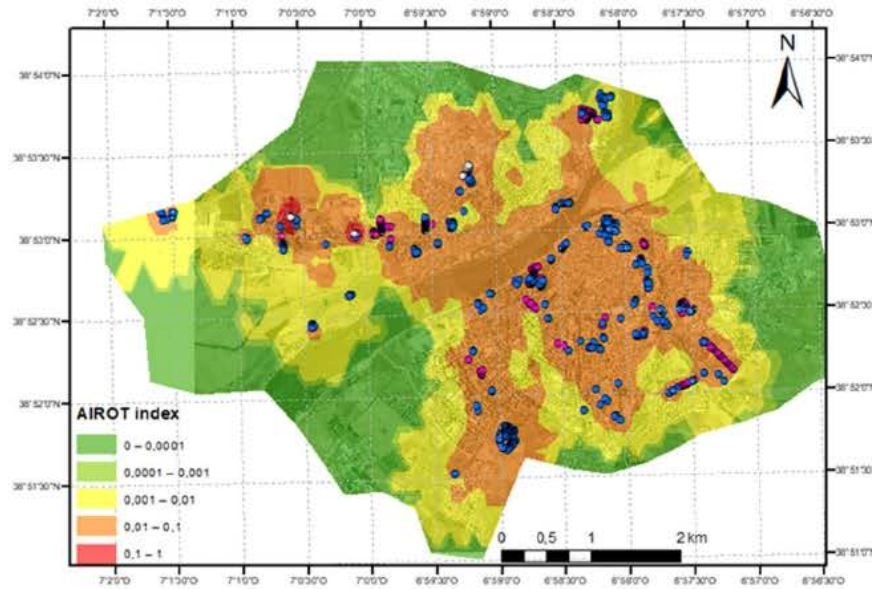
Table S1. Results for the different functions that were tested in the Kriging analysis according to the RMSE and Spearman's rank coefficient. The best scores are presented in bold.

City	Function Maps	Stable	Circular	Spherical	Exponential	Gaussian
Badajoz	JAN	r: 0.529	r: 0.634	r: 0.640	r: 0.663	r: 0.564
		RMSE: 0.929	RMSE: 0.703	RMSE: 0.699	RMSE: 0.731	RMSE: 0.712
	FEB	r: 0.784	r: 0.785	r: 0.786	r: 0.824	r: 0.779
		RMSE: 1.281	RMSE: 1.274	RMSE: 1.263	RMSE: 1.232	RMSE: 1.278
	MAR	r: 0.800	r: 0.794	r: 0.811	r: 0.817	r: 0.800
		RMSE: 0.854	RMSE: 1.185	RMSE: 1.036	RMSE: 1.041	RMSE: 1.123
	MAYJUN	r: 0.825	r: 0.824	r: 0.824	r: 0.824	r: 0.825
		RMSE: 0.650	RMSE: 0.614	RMSE: 0.567	RMSE: 0.469	RMSE: 0.650
Cáceres	JAN	r: 0.719	r: 0.716	r: 0.721	r: 0.741	r: 0.707
		RMSE: 1.778	RMSE: 1.615	RMSE: 1.602	RMSE: 1,653	RMSE: 1,609
	FEB	r: 0.752	r: 0.707	r: 0.711	r: 0.738	r: 0.674
		RMSE: 1,422	RMSE: 1,279	RMSE: 1,277	RMSE: 1,296	RMSE: 1,248
	MAR	r: 0.707	r: 0.730	r: 0.738	r: 0.760	r: 0.707
		RMSE: 1.345	RMSE: 1.323	RMSE: 1.276	RMSE: 1.370	RMSE: 1.342
	MAYJUN	r: 0.768	r: 0.764	r: 0.764	r: 0.800	r: 0.750
		RMSE: 0.732	RMSE: 0.819	RMSE: 0.824	RMSE: 0.845	RMSE: 0.854
Don Benito	JAN	r: 0.857	r: 0.854	r: 0.855	r: 0.853	r: 0.854
		RMSE: 0.031	RMSE: 0.031	RMSE: 0.031	RMSE: 0.031	RMSE: 0.030
	FEB	r: 0.729	r: 0.774	r: 0.688	r: 0.733	r: 0.738
		RMSE: 0.097	RMSE: 0.097	RMSE: 0.099	RMSE: 0.097	RMSE: 0.100
	MAR	r: 0.750	r: 0.766	r: 0.769	r: 0.772	r: 0.750
		RMSE: 0.658	RMSE: 0.645	RMSE: 0.643	RMSE: 0.647	RMSE: 0.658
	MAYJUN	r: 0.475	r: 0.499	r: 0.476	r: 0.464	r: 0.516
		RMSE: 0.497	RMSE: 0.594	RMSE: 0.557	RMSE: 0.409	RMSE: 0.751
Plasencia	JAN	r: 0.905	r: 0.906	r: 0.906	r: 0.906	r: 0.906
		RMSE: 0.804	RMSE: 0.477	RMSE: 0.483	RMSE: 0.588	RMSE: 1.522
	FEB	r: 0.482	r: 0.482	r: 0.516	r: 0.524	r: 0.395
		RMSE: 0.823	RMSE: 0.783	RMSE: 0.739	RMSE: 0.810	RMSE: 0.803
	MAR	r: 0.446	r: 0.474	r: 0.450	r: 0.475	r: 0.390
		RMSE: 0.830	RMSE: 0.794	RMSE: 0.821	RMSE: 1.054	RMSE: 0.874
	MAYJUN	r: 0.708	r: 0.712	r: 0.720	r: 0.722	r: 0.722
		RMSE: 0.451	RMSE: 0.475	RMSE: 0.430	RMSE: 0.621	RMSE: 0.419
Zafra	JAN	r= 0.895	r=0.902	r= 0.905	r=0.921	r=0.895
		RMSE=0.046	RMSE: 0.040	RMSE: 0.040	RMSE: 0.038	RMSE: 0.046
	FEB	r: 0.696	r: 0.784	r: 0.788	r: 0.799	r: 0.696
		RSME: 0.024	RMSE: 0.026	RMSE: 0.026	RMSE: 0.027	RMSE: 0.024

MAR	r: 0.709	r: 0.783	r: 0.793	r: 0.804	r: 0.709
	RSME: 0.024	RSME: 0.027	RMSE: 0.027	RMSE: 0.028	RMSE: 0.024
MAYJUN	r: 0.793	r: 0.792	r: 0.792	r: 0.794	r: 0.793
	RMSE: 0.066	RMSE: 0.061	RMSE: 0.060	RMSE: 0.059	RMSE: 0.066



(a)



(b)

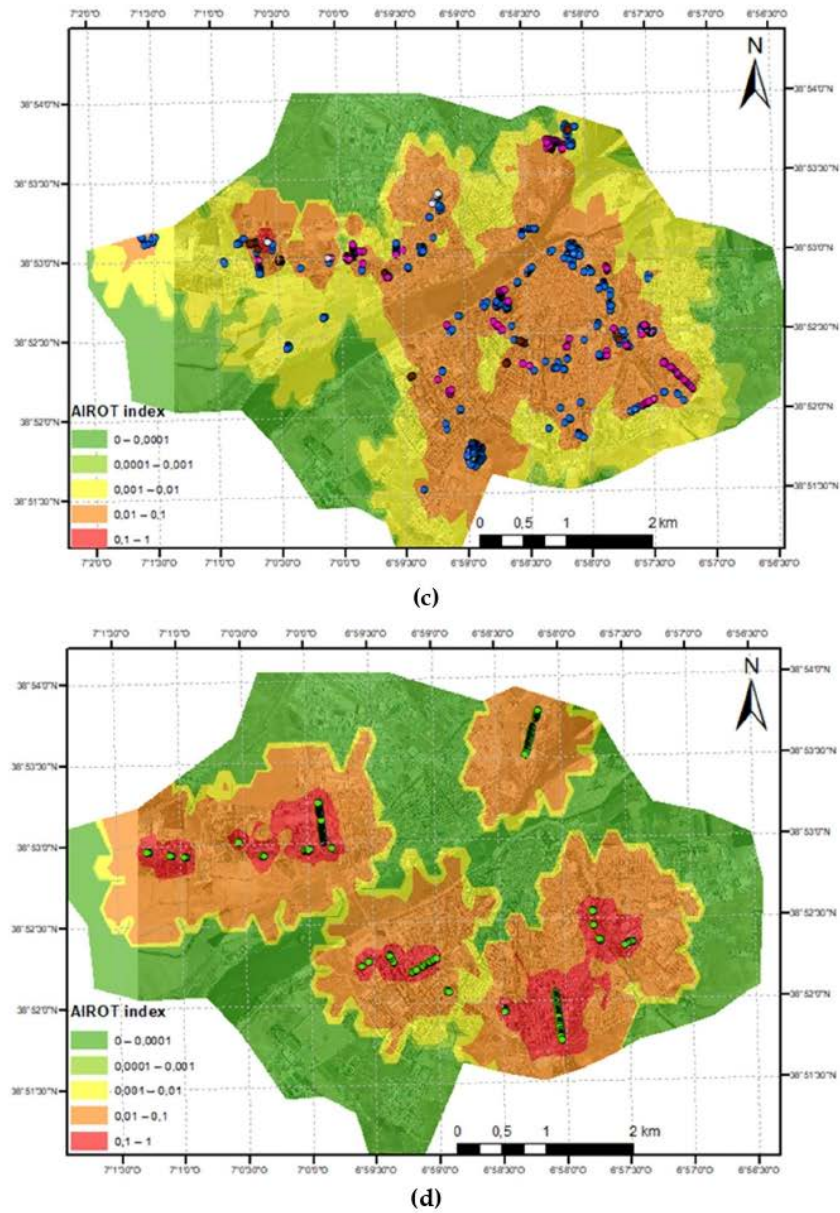
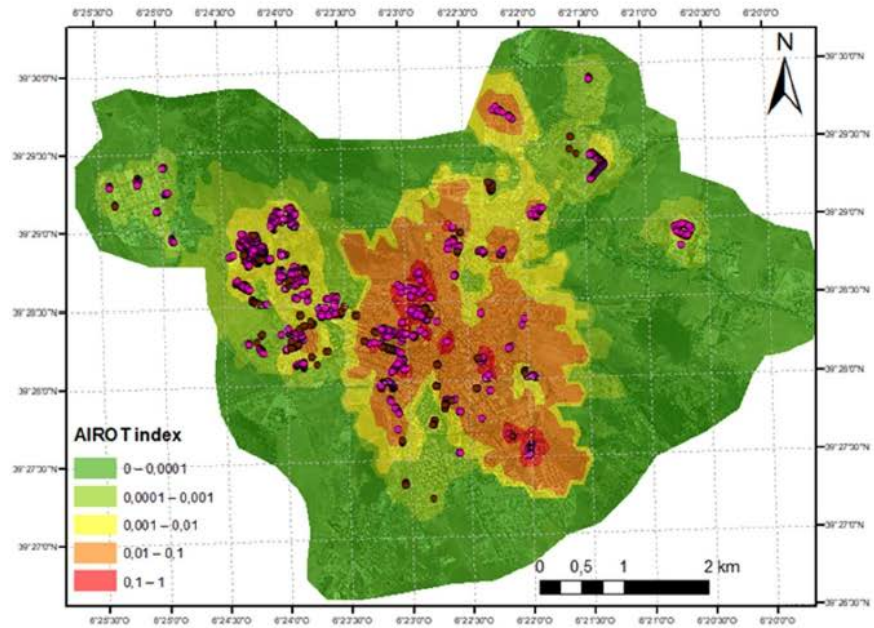
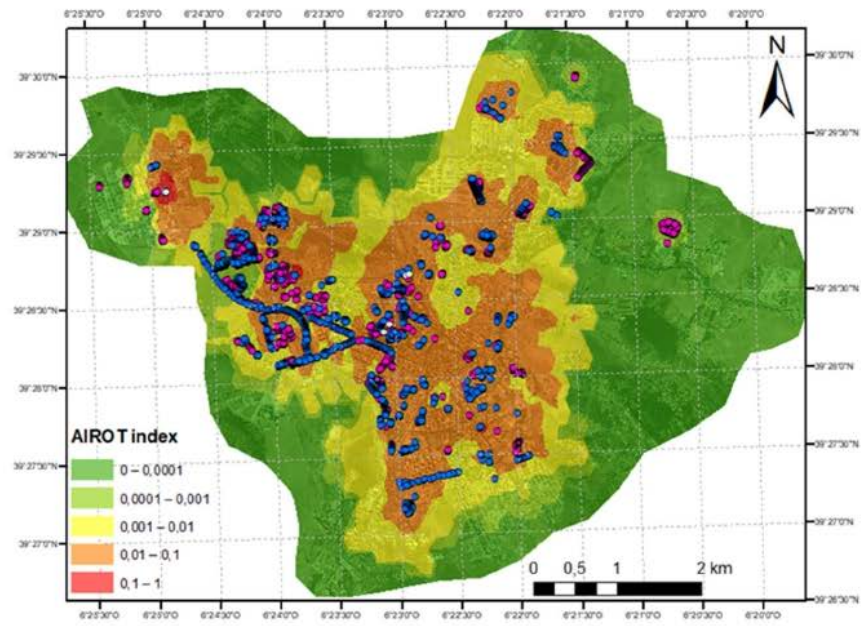


Figure S1. Risk maps of Badajoz for each month according to the AIROT index. (a) shows the AIROT values in the month of January for the species *C. arizonica* and *P. orientalis*. (b) shows the values in the month of February for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *C. sempervirens* and *P. orientalis*. (c) shows the values in the month of March for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa* and *C. sempervirens*. (d) shows the values in the months May-June for the species *C. leylandii*.



(a)



(b)

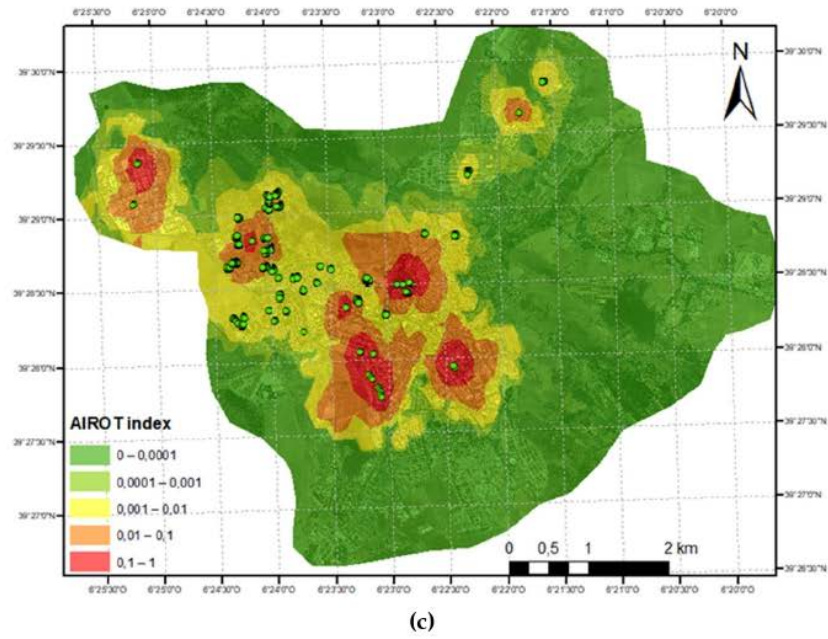
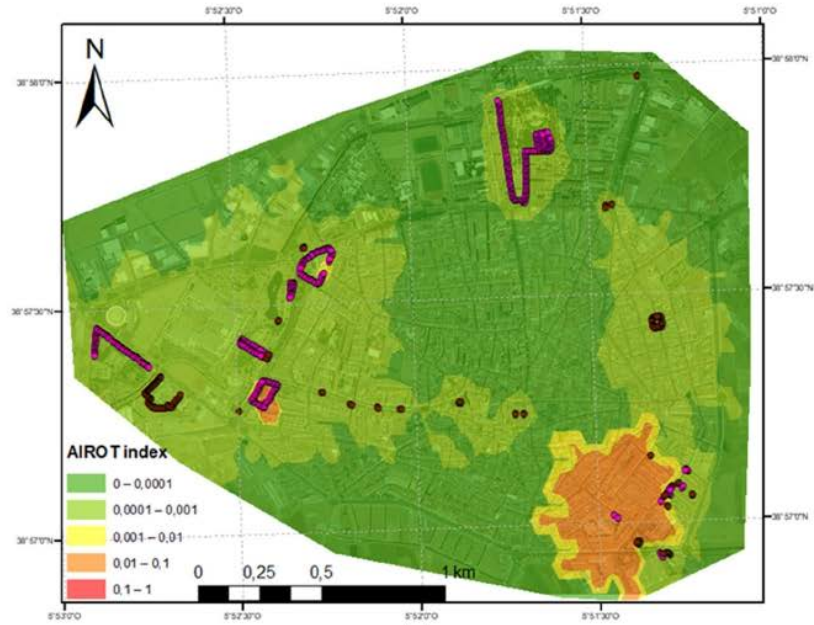
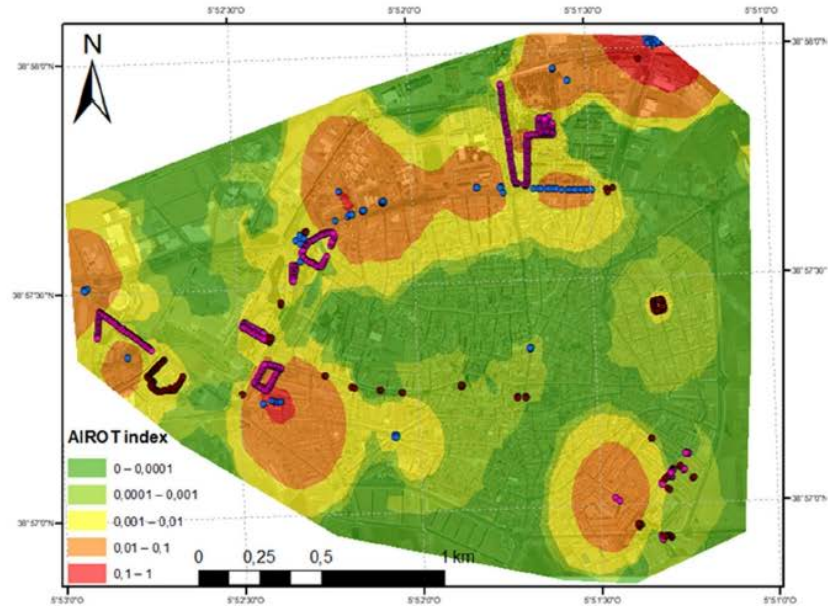


Figure S2. Risk maps of Cáceres for each month according to the AIROT index. (a) shows the AIROT values in the month of January for the species *C. arizonica* and *P. orientalis*. (b) shows the values in the month of February for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *C. sempervirens* and *P. orientalis*. (c) shows the values in the month of March for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa* and *C. sempervirens*. Figure S2D shows the values in the months May-June for the species *C. leylandii*.



(a)



(b)

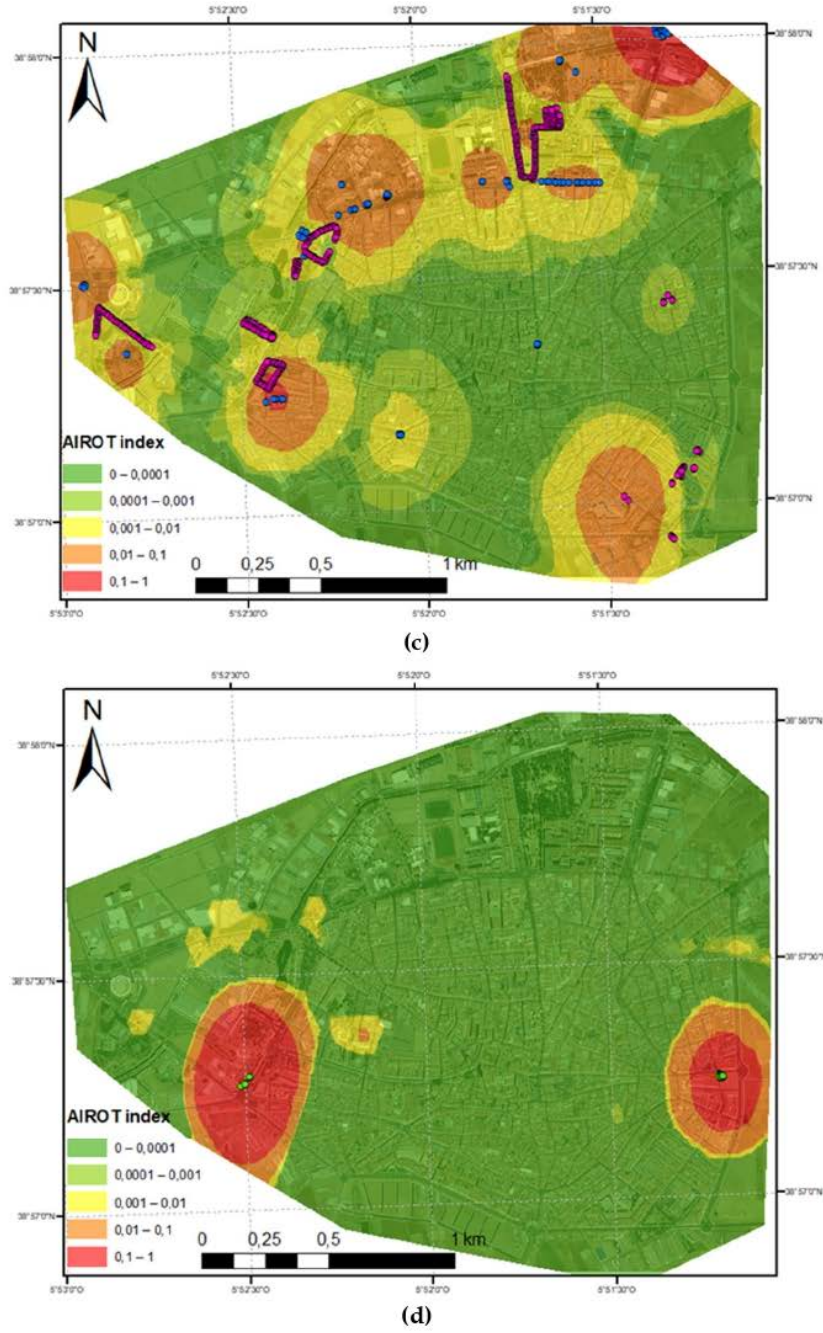
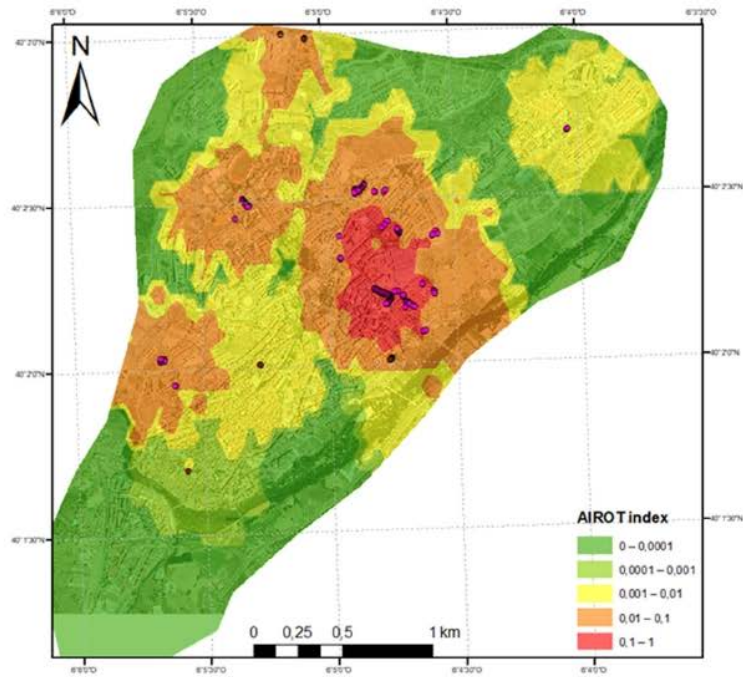
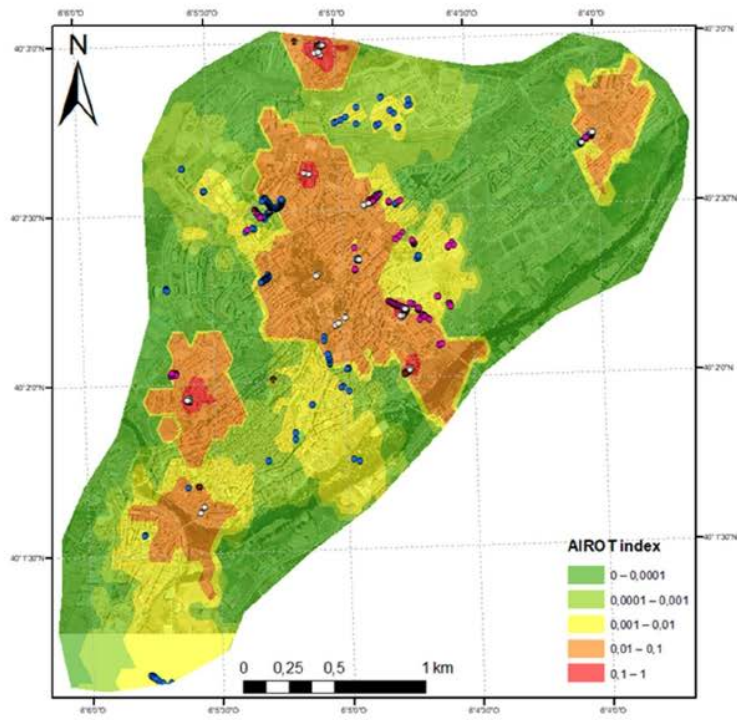


Figure S3. Risk maps of Don Benito for each month according to the AIROT index. (a) shows the AIROT values in the month of January for the species *C. arizonica* and *P. orientalis*. (b) shows the values in the month of February for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *C. sempervirens* and *P. orientalis*. (c) shows the values in the month of March for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa* and *C. sempervirens*. (d) shows the values in the months May-June for the species *C. leylandii*.



(a)



(b)

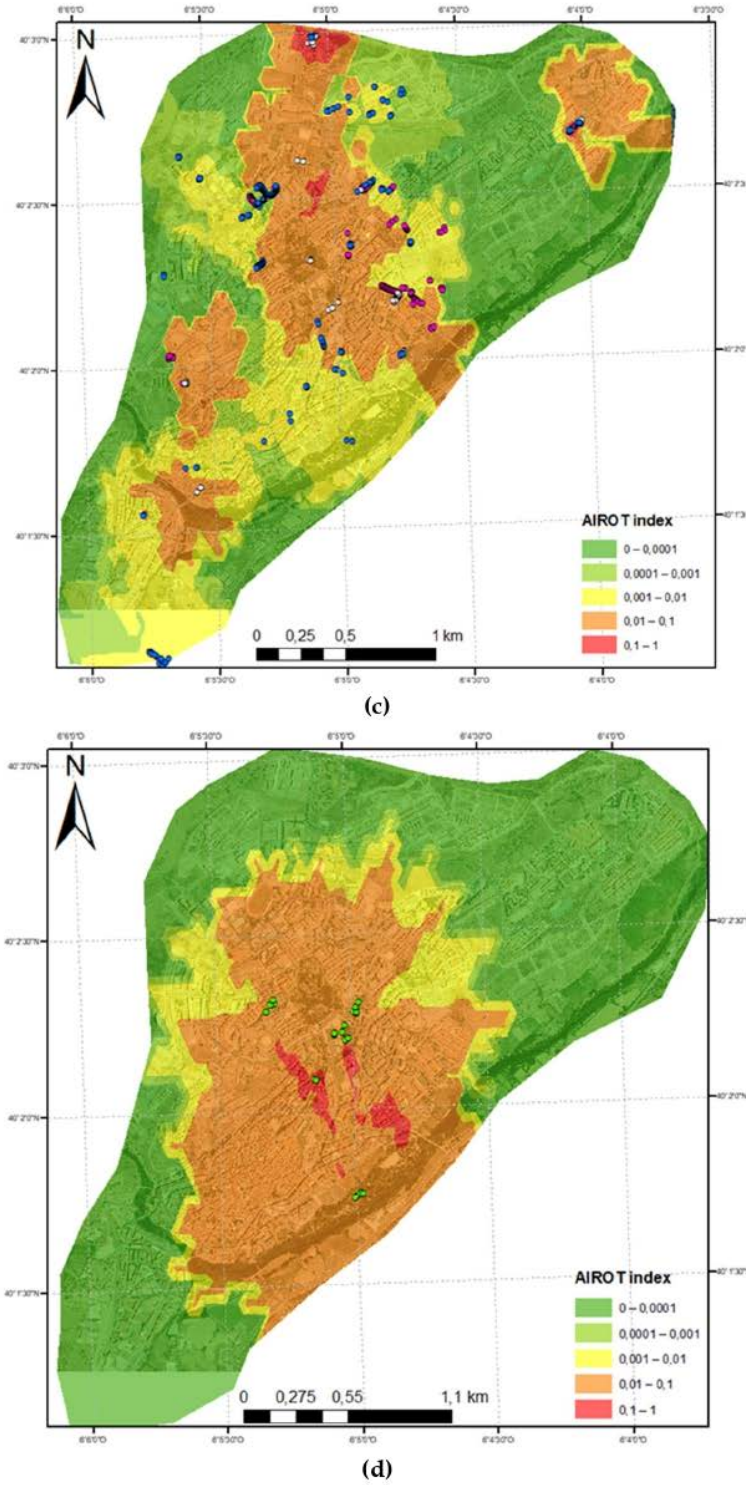
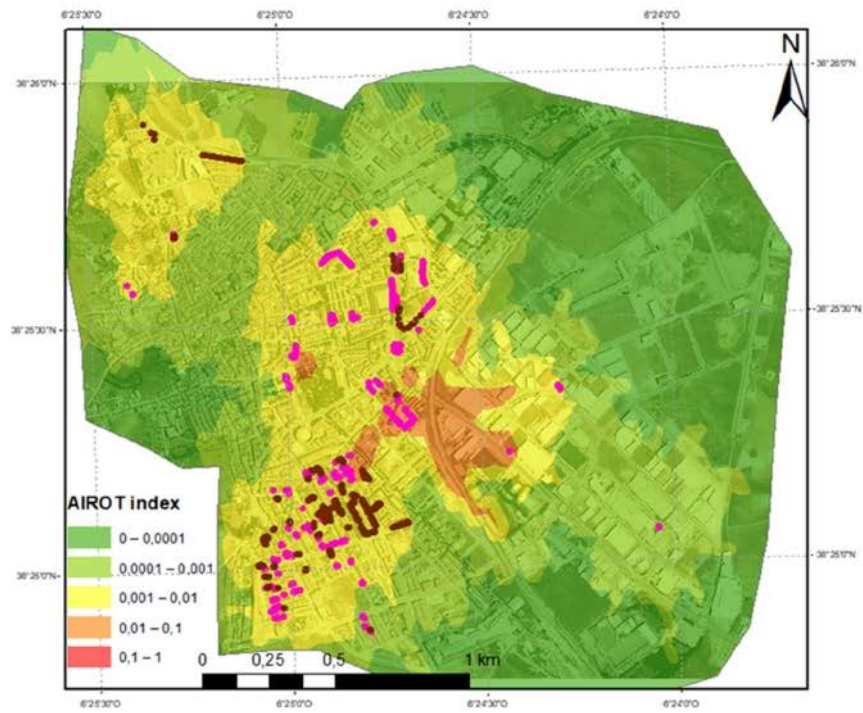
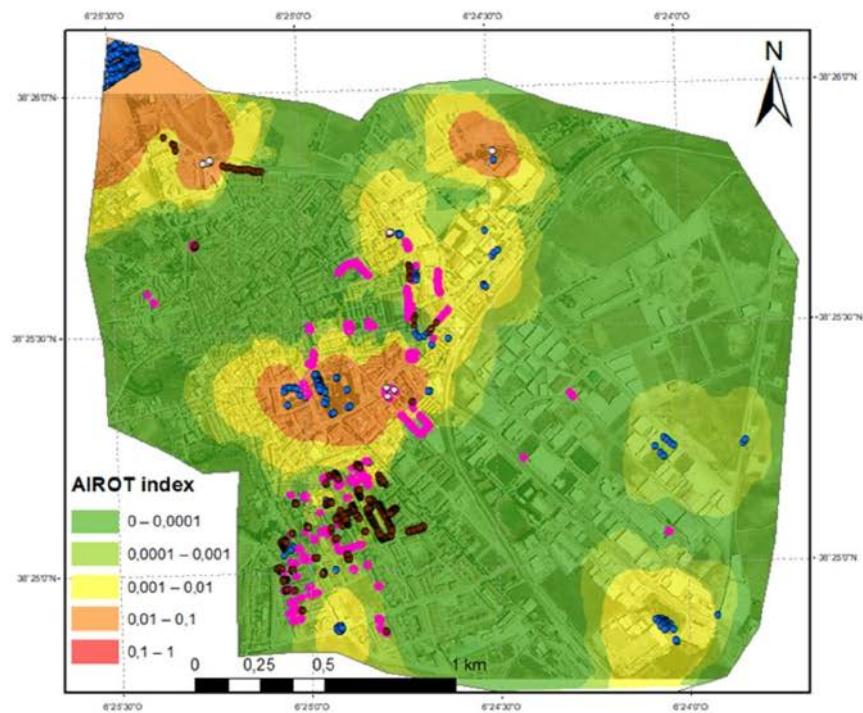


Figure S4. Risk maps of Plasencia for each month according to the AIROT index. (a) shows the AIROT values in the month of January for the species *C. arizonica* and *P. orientalis*. (b) shows the values in the month of February for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *C. sempervirens* and *P. orientalis*. (c) shows the values in the month of March for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa* and *C. sempervirens*. (d) shows the values in the months May-June for the species *C. leylandii*.



(a)



(b)

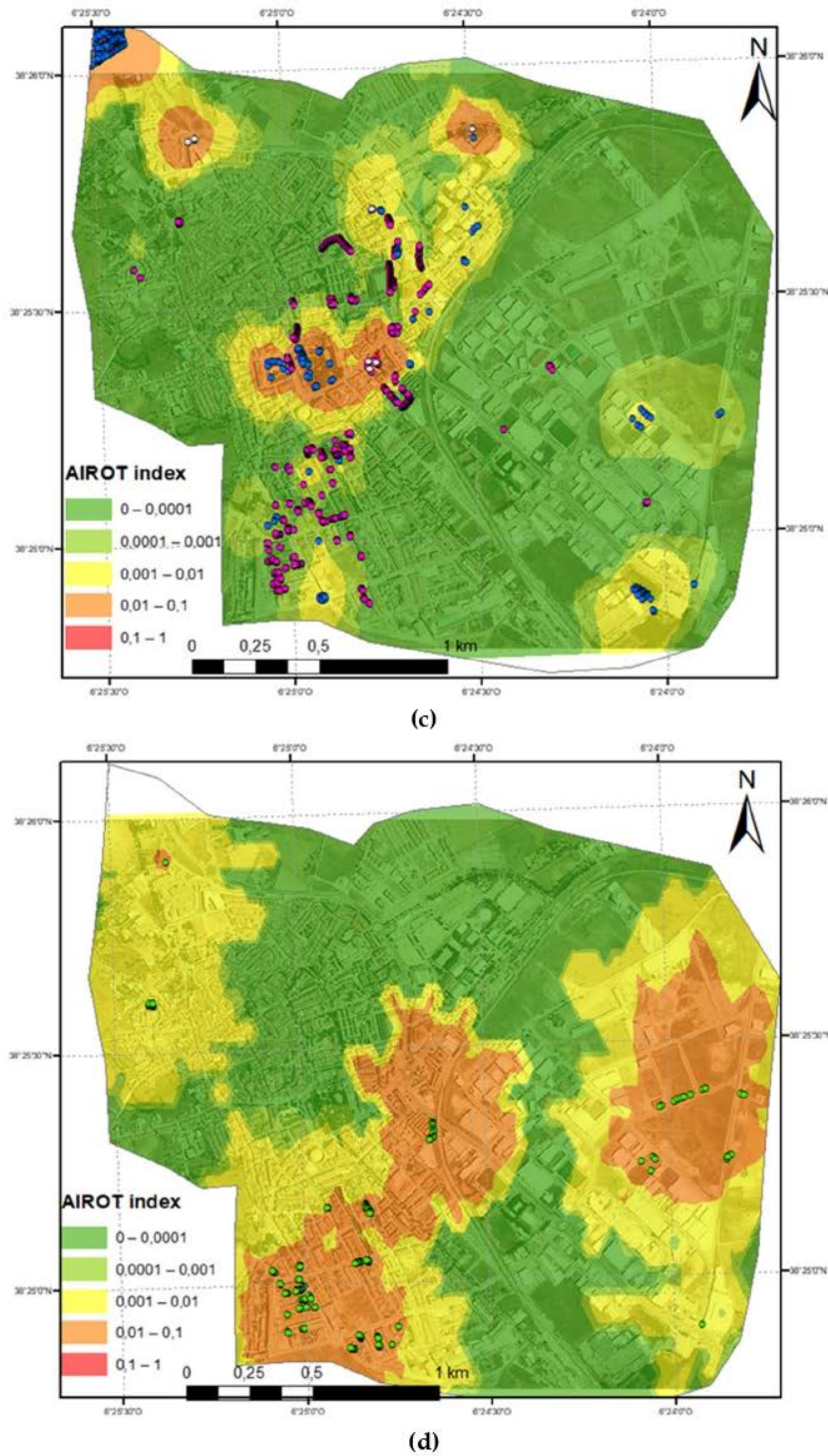
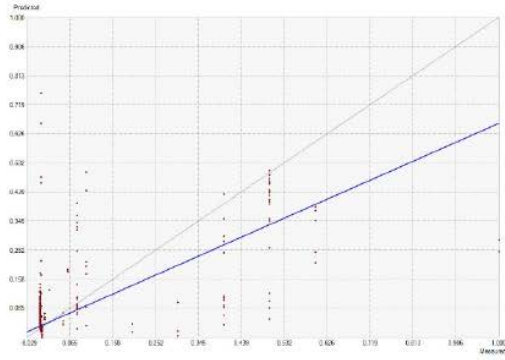


Figure S5. Risk maps of Zafra for each month according to the AIROT index. (a) shows the AIROT values in the month of January for the species *C. arizonica* and *P. orientalis*. (b) shows the values in the month of February for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa*, *C. sempervirens* and *P. orientalis*. (c) shows the values in the month of March for the species *C. arizonica*, *C. macrocarpa* and *C. sempervirens*. (d) shows the values in the months May-June for the species *C. leylandii*.

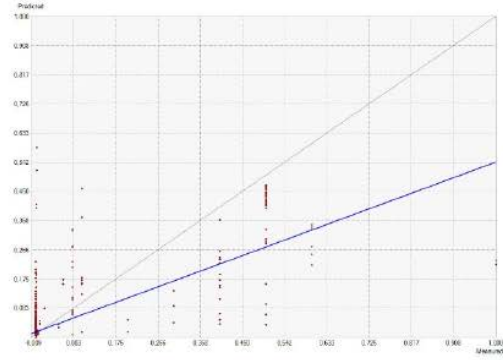
Figure S6. Results for the cross-validation test.

BADAJOS

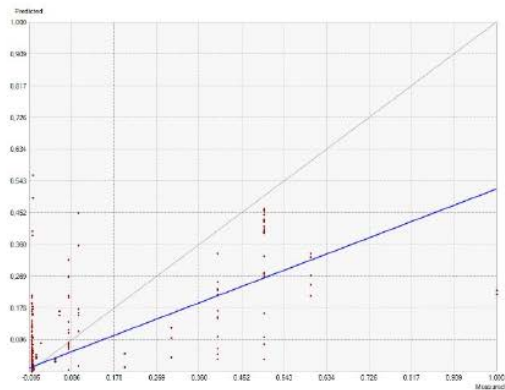
JAN



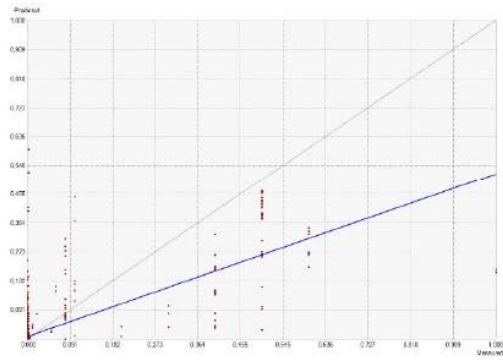
Stable



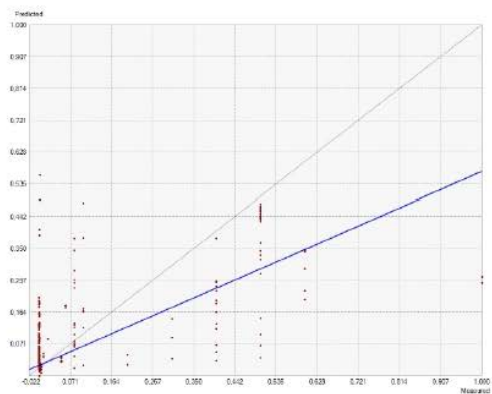
Circular



Spherical

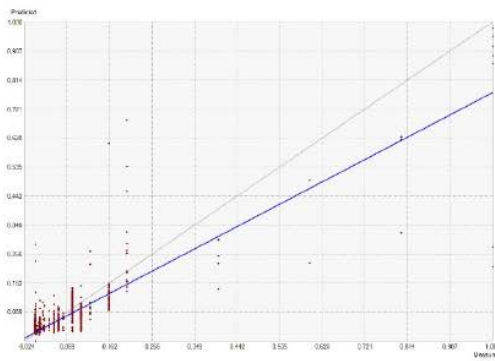


Exponential

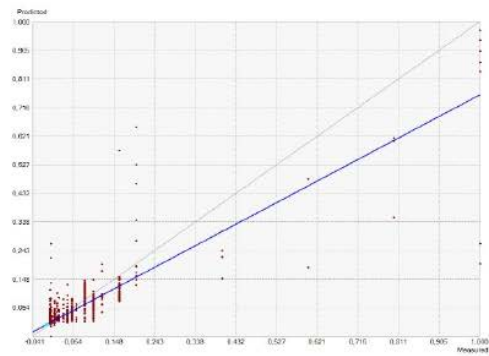


Gaussian

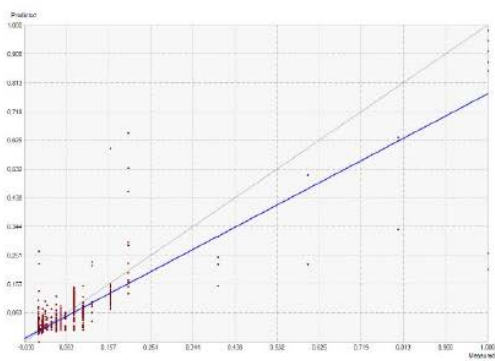
FEB



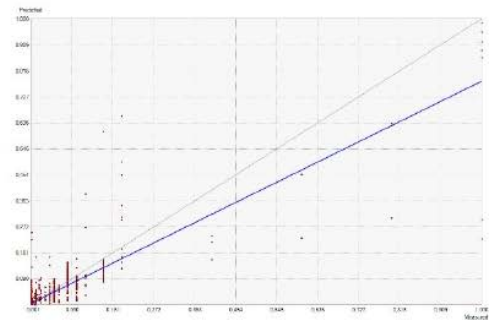
Stable



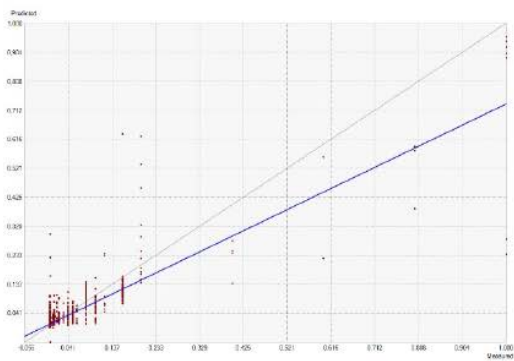
Circular



Spherical

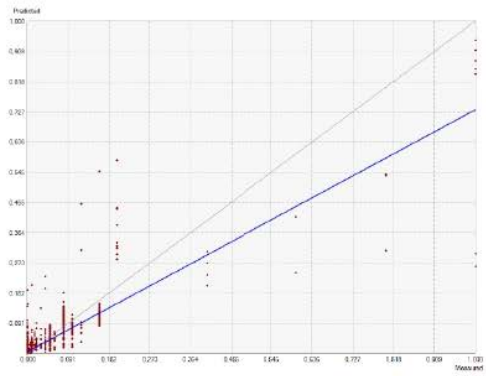


Exponential

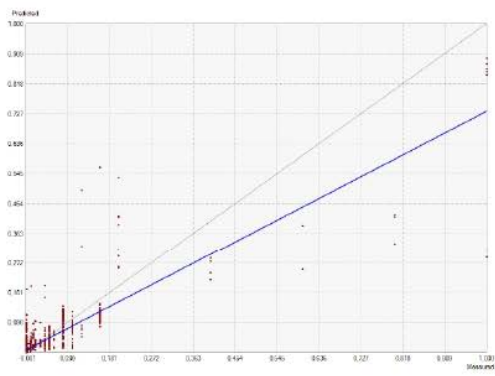


Gaussian

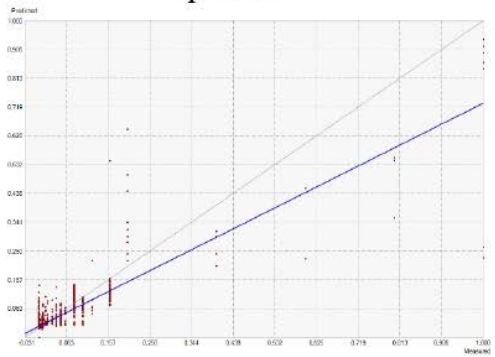
MAR



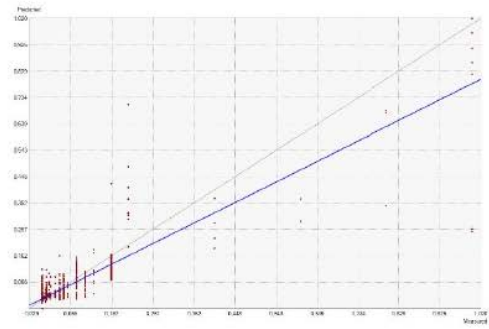
Stable



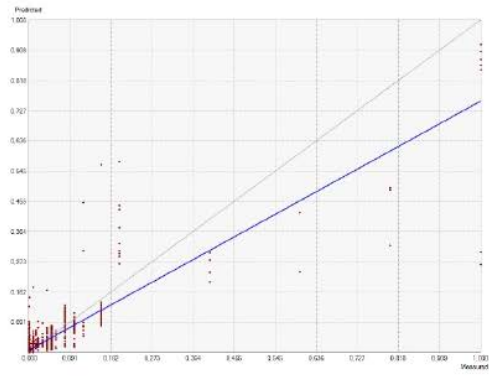
Spherical



Gaussian

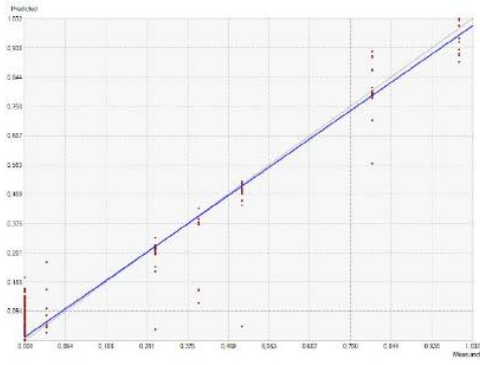


Circular

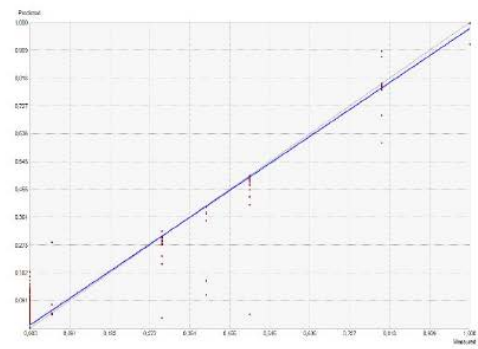


Exponential

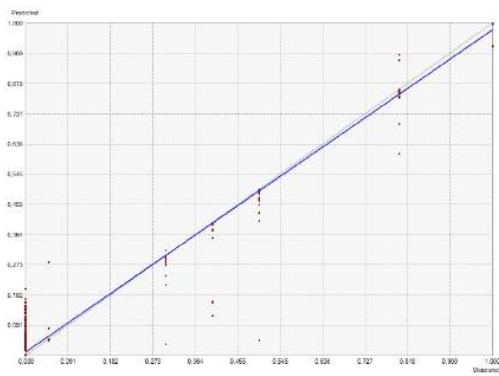
MAY/JUN



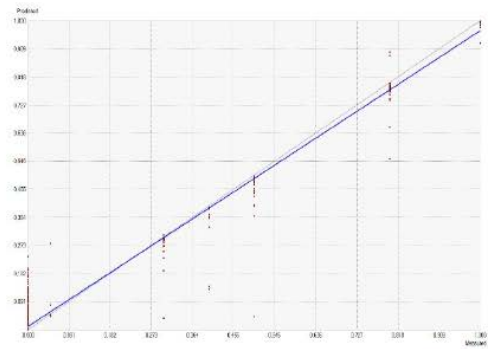
Stable



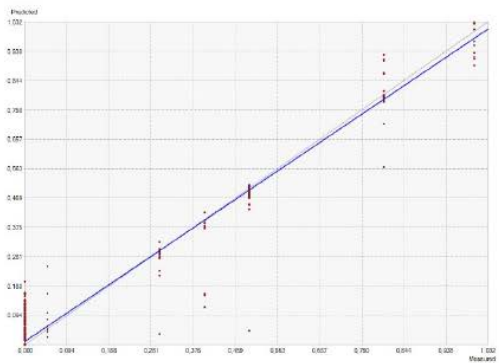
Circular



Spherical



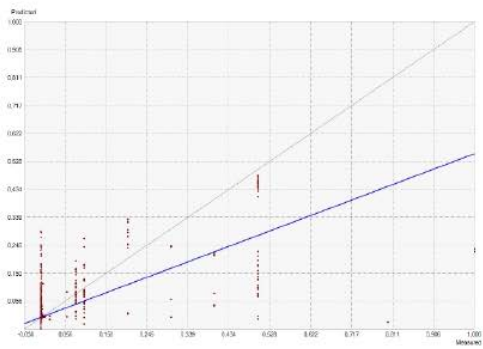
Exponential



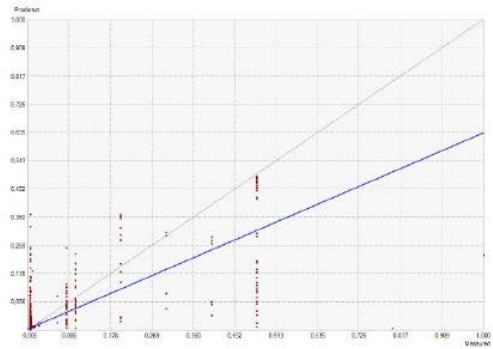
Gaussian

CÁCERES

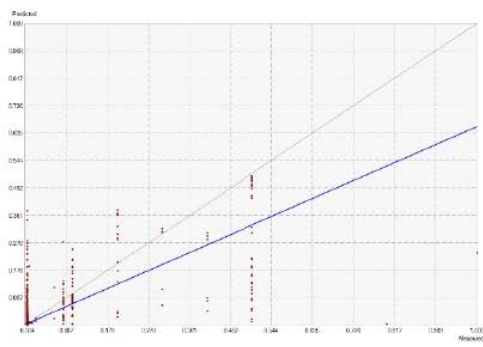
JAN



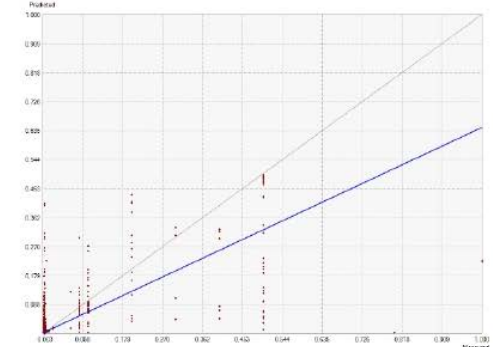
Stable



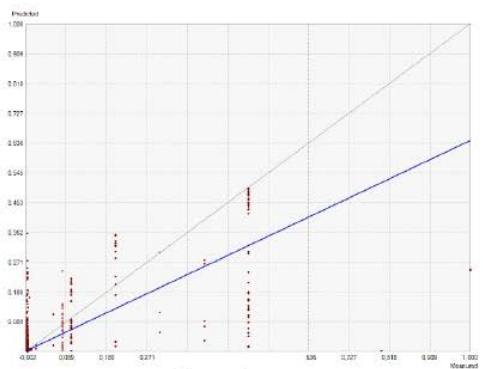
Circular



Spherical

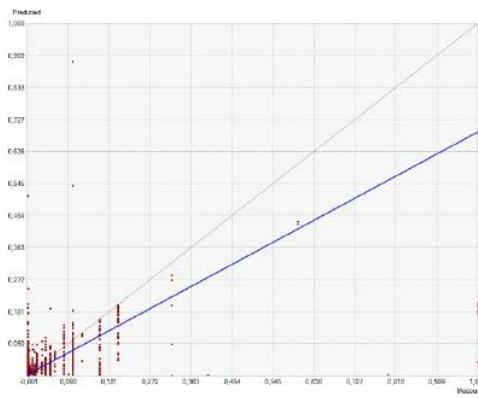


Exponential

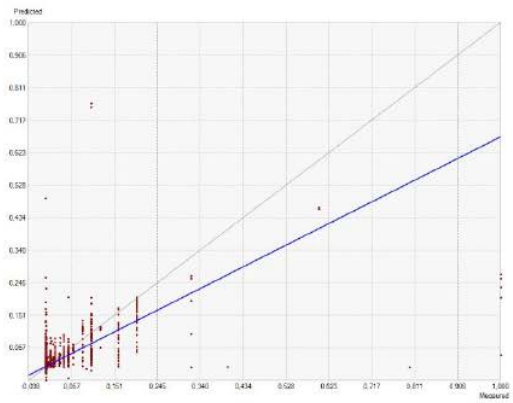


Gaussian

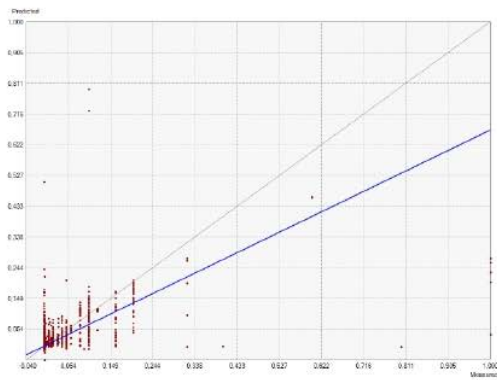
FEB



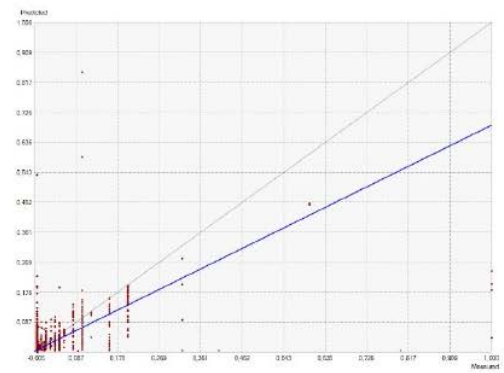
Stable



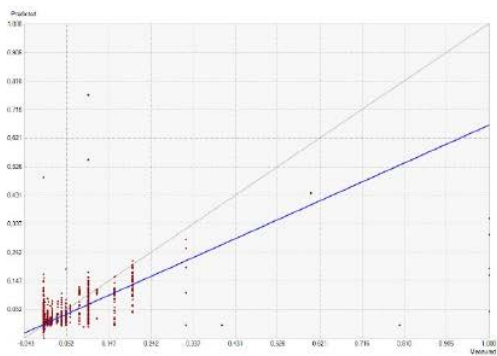
Circular



Spherical

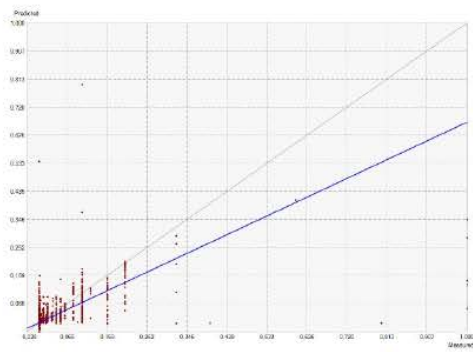


Exponential

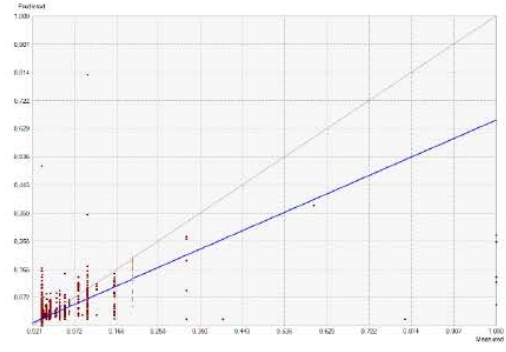


Gaussian

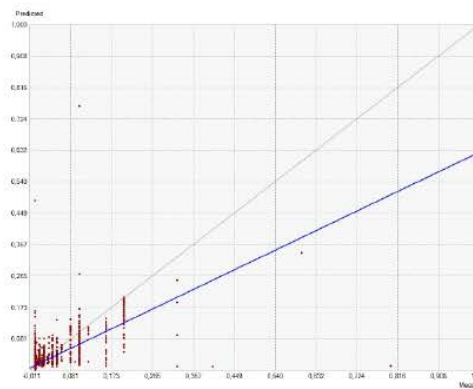
MAR



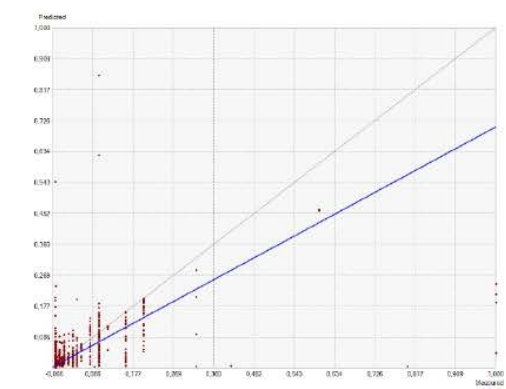
Stable



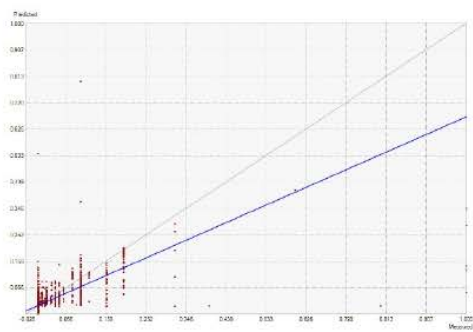
Circular



Spherical

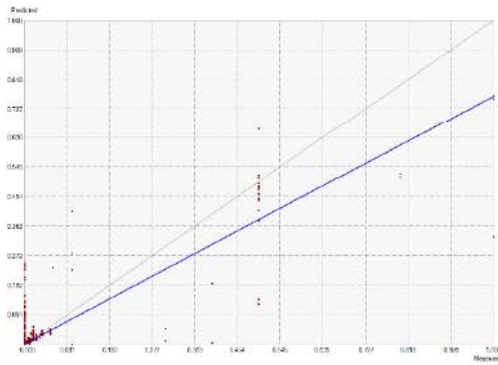


Exponential

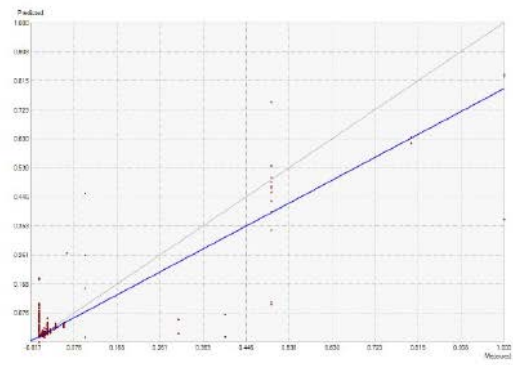


Gaussian

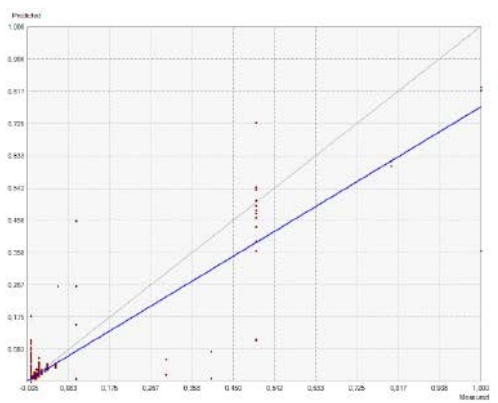
MAY/JUN



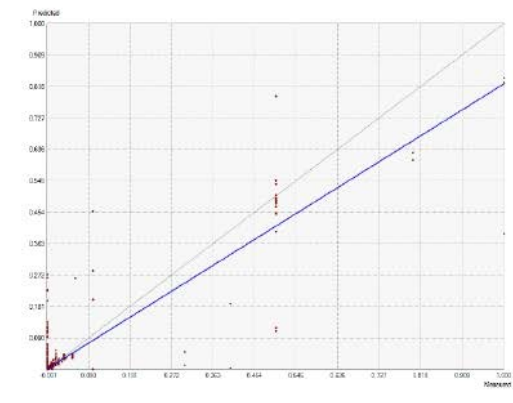
Stable



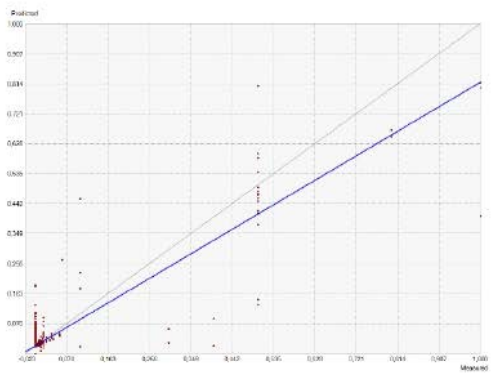
Circular



Spherical



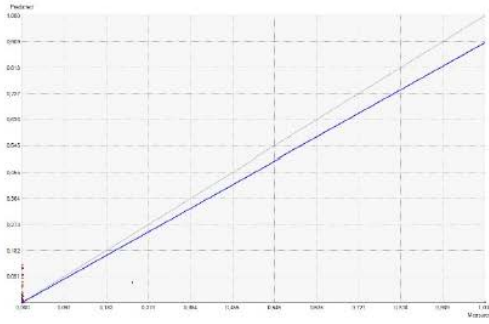
Exponential



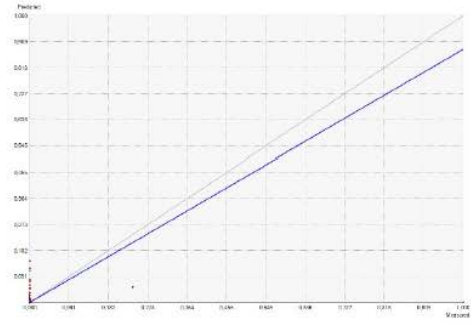
Gaussian

DON BENITO

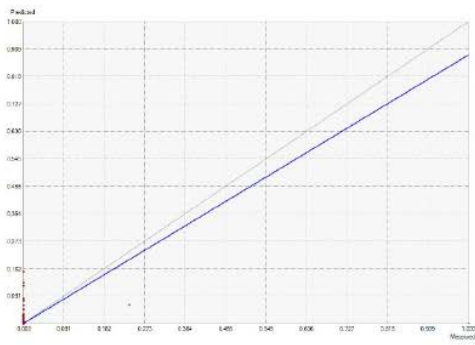
JAN



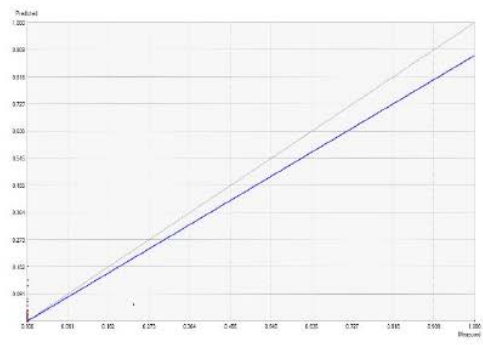
Stable



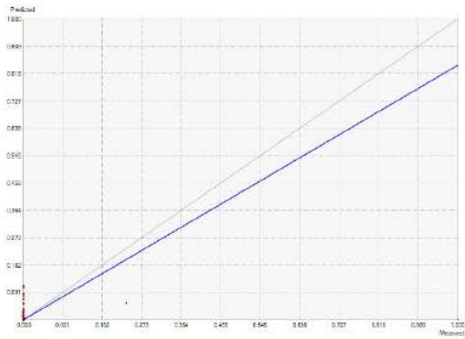
Circular



Spherical

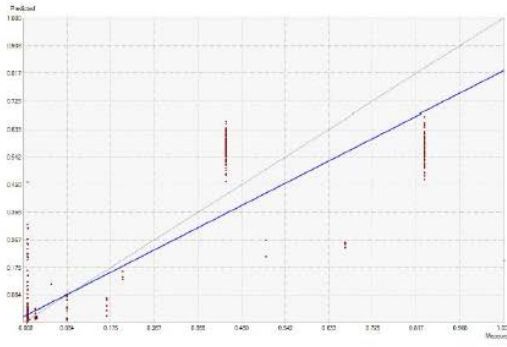


Exponential

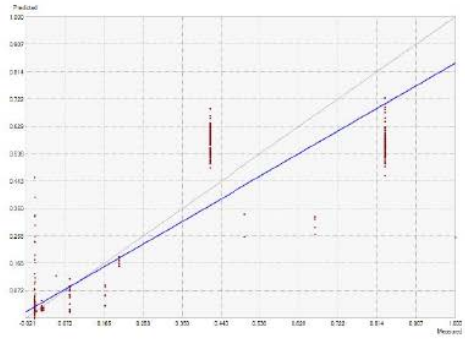


Gaussian

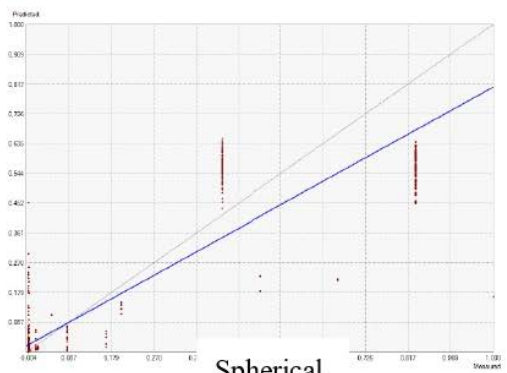
FEB



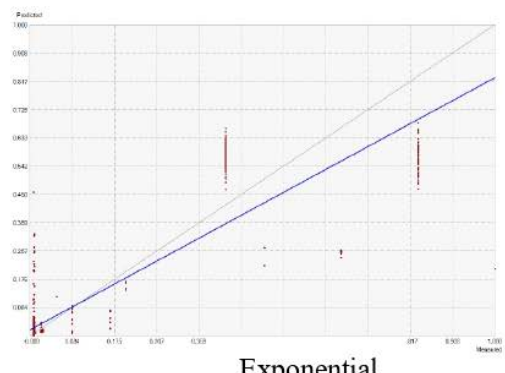
Stable



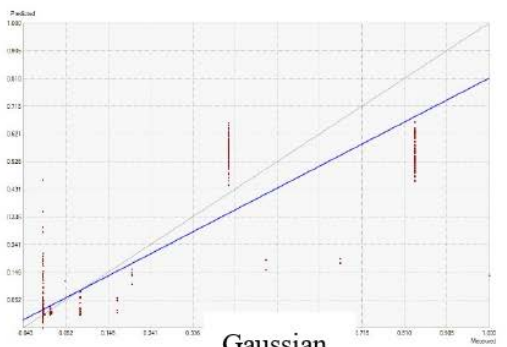
Circular



Spherical

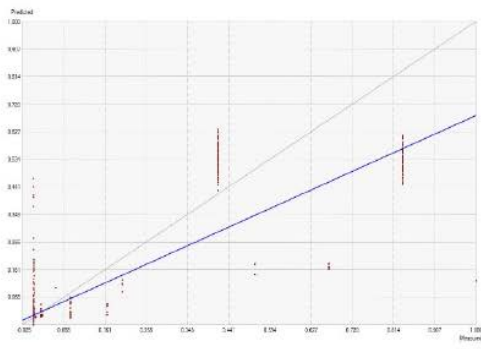


Exponential

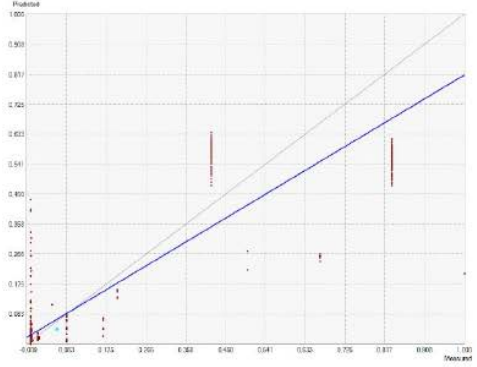


Gaussian

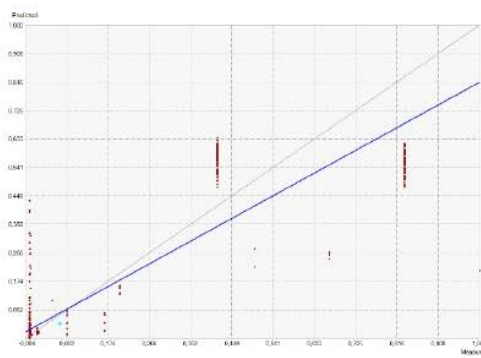
MAR



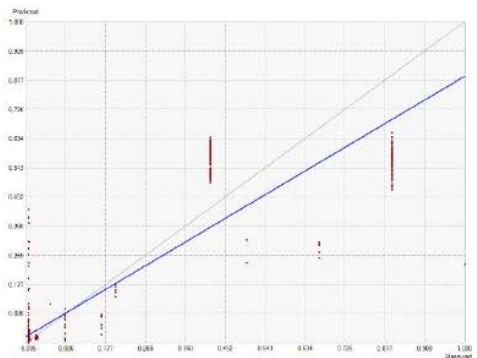
Stable



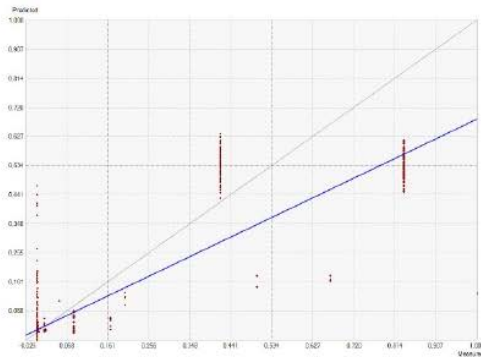
Circular



Spherical

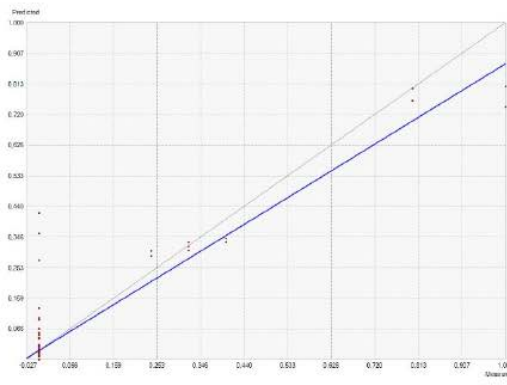


Exponential

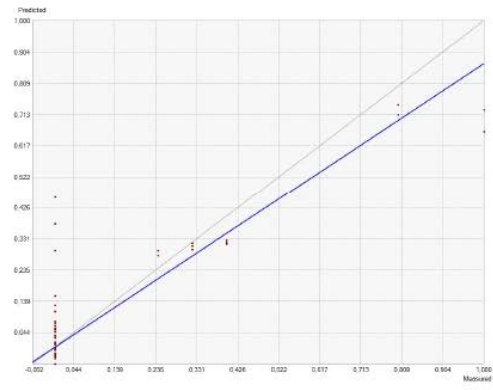


Gaussian

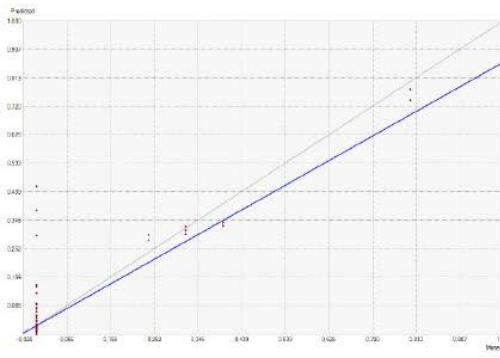
MAY/JUN



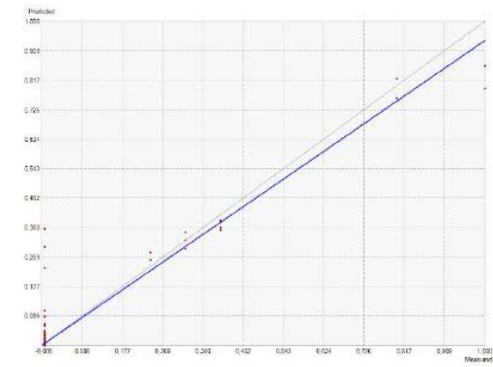
Stable



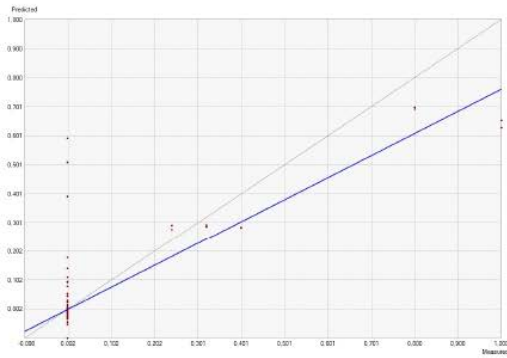
Circular



Spherical



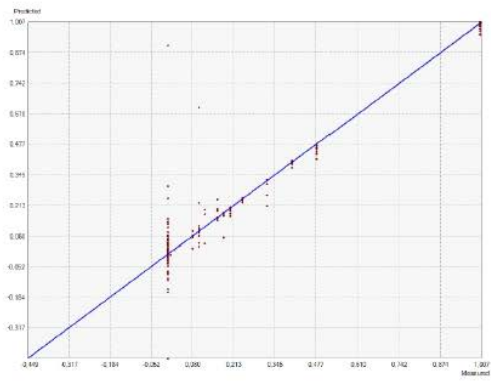
Exponential



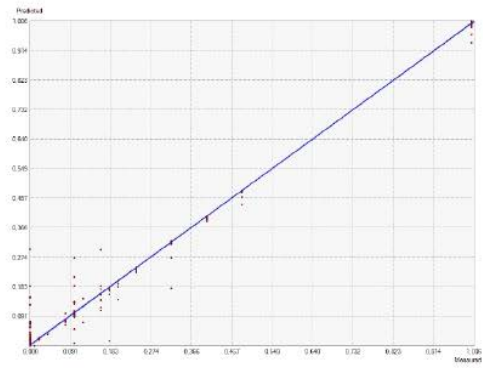
Gaussian

PLASENCIA

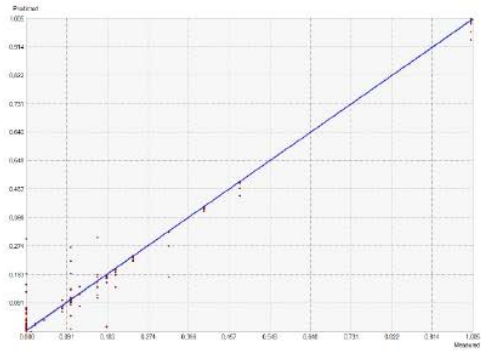
JAN



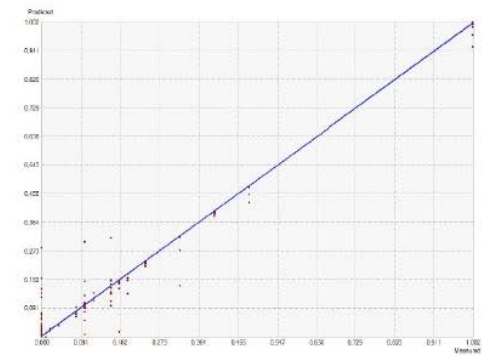
Stable



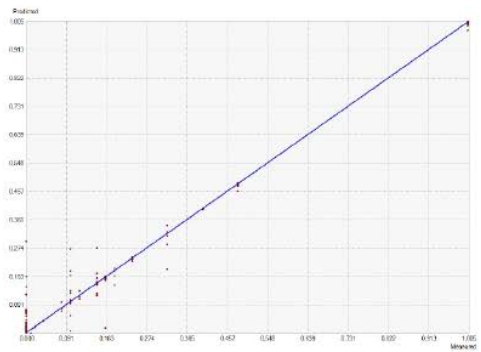
Circular



Spherical

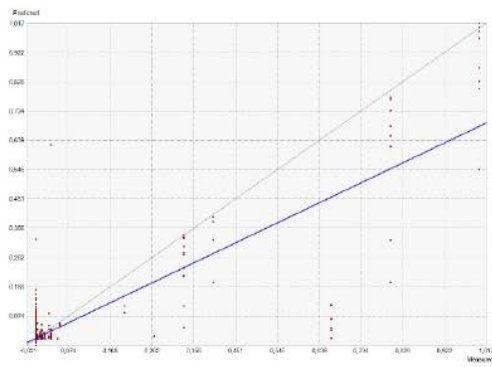


Exponential

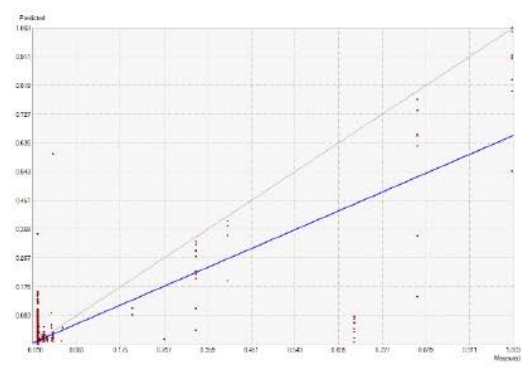


Gaussian

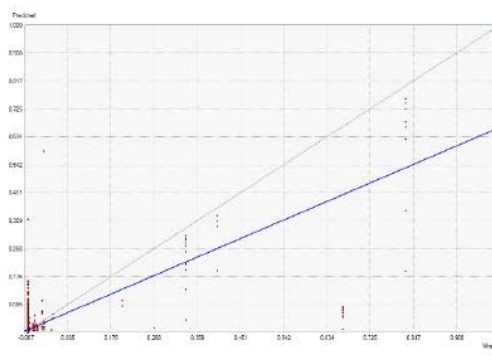
FEB



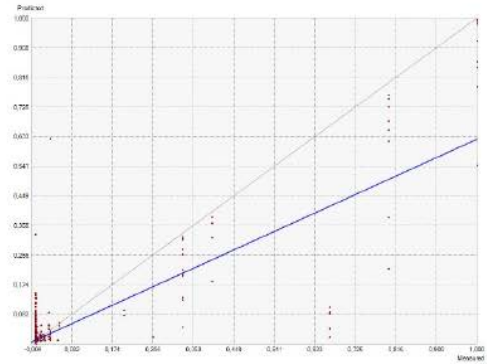
Stable



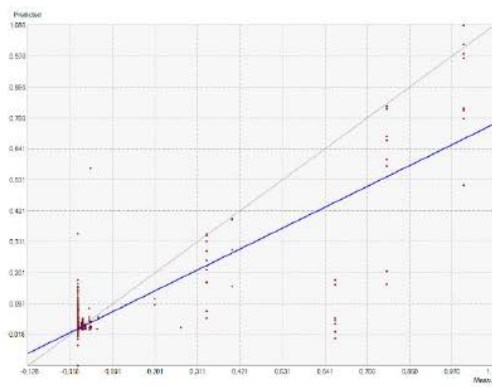
Circular



Spherical

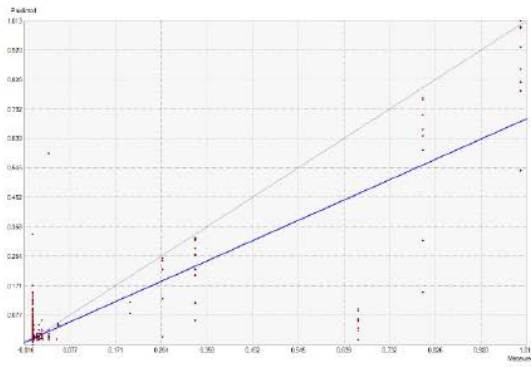


Exponential

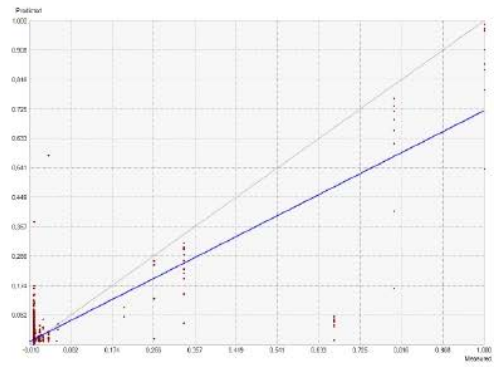


Gaussian

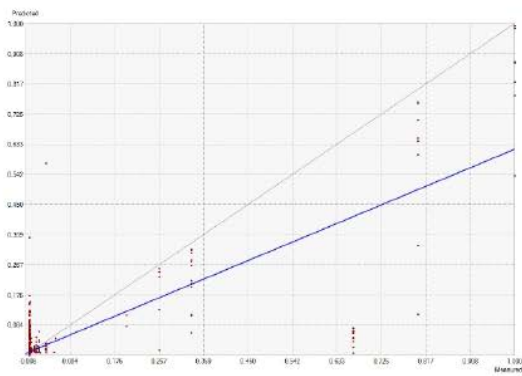
MAR



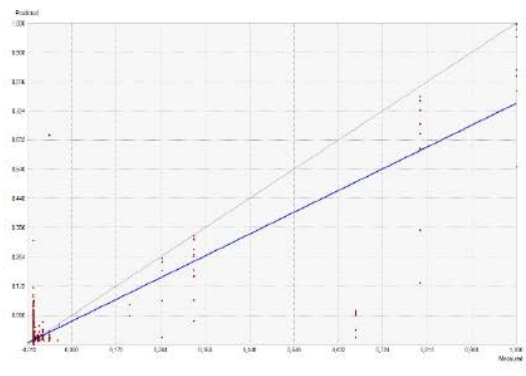
Stable



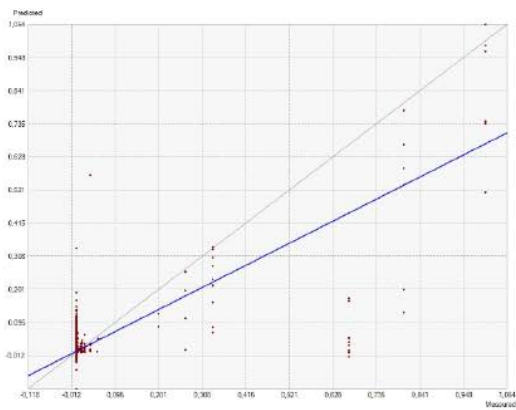
Circular



Spherical

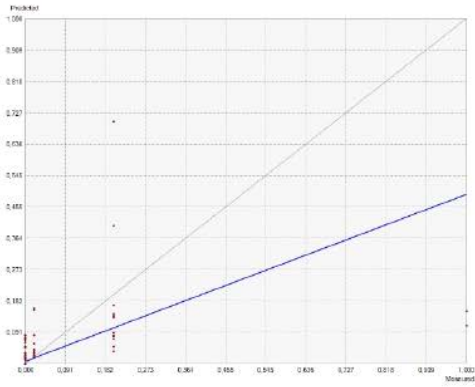


Exponential

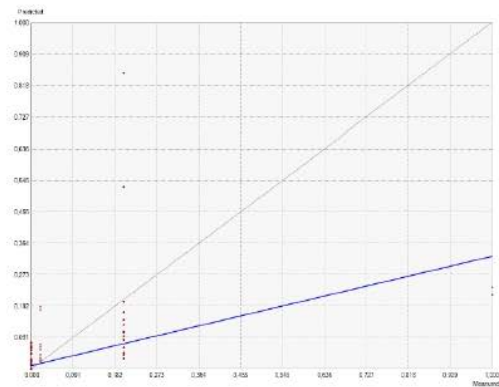


Gaussian

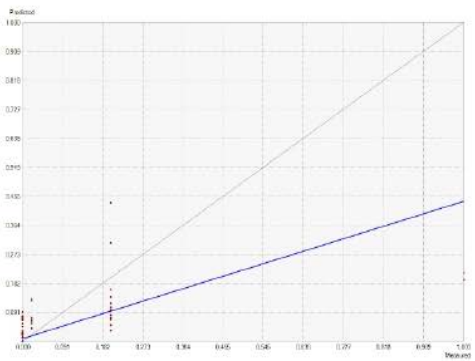
MAY/JUN



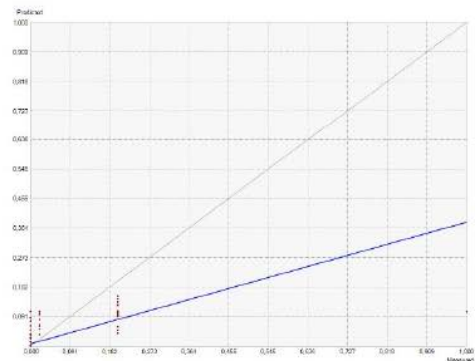
Stable



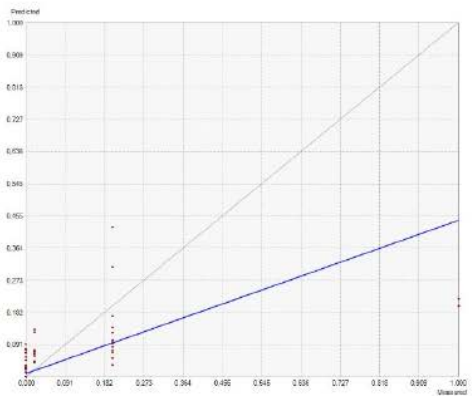
Circular



Spherical



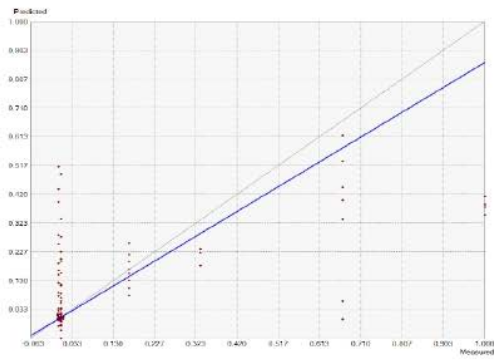
Exponential



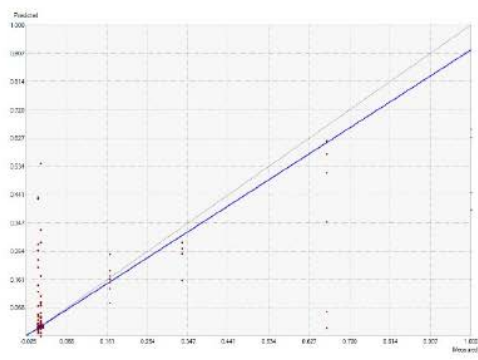
Gaussian

ZAFRA

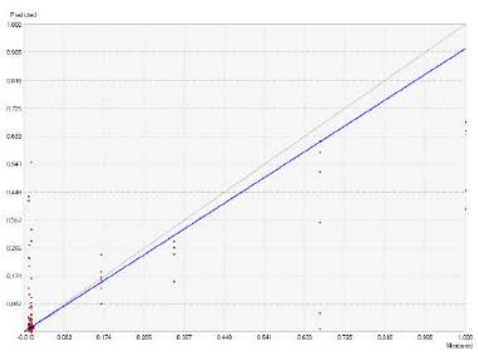
JAN



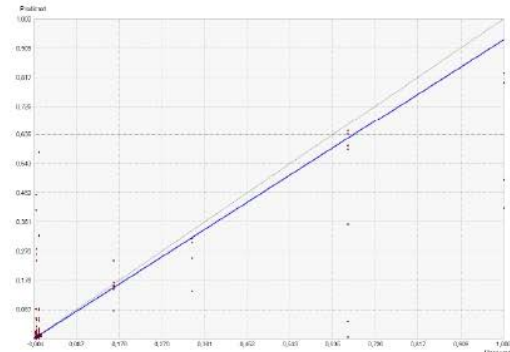
Stable



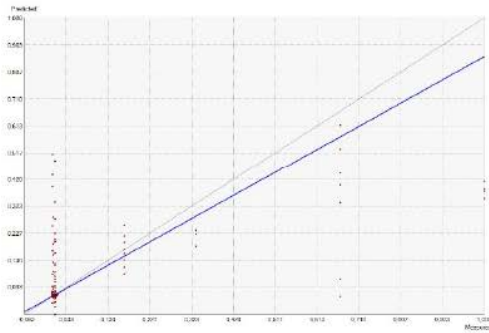
Circular



Spherical

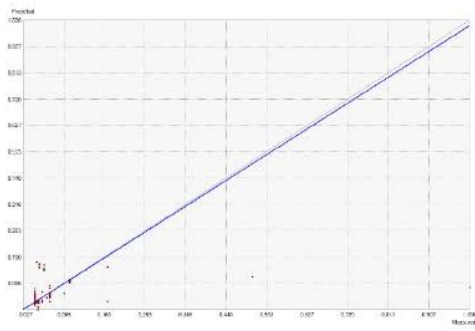


Exponential

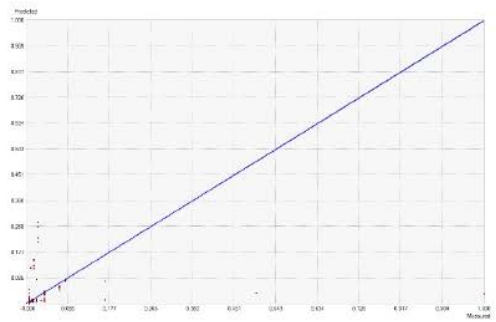


Gaussian

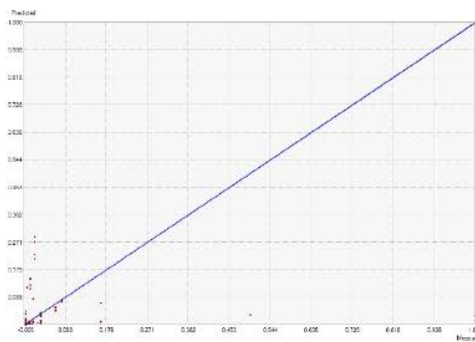
FEB



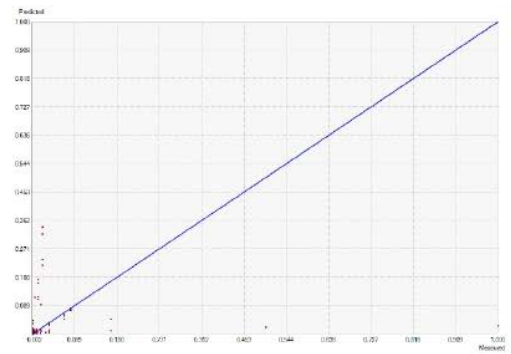
Stable



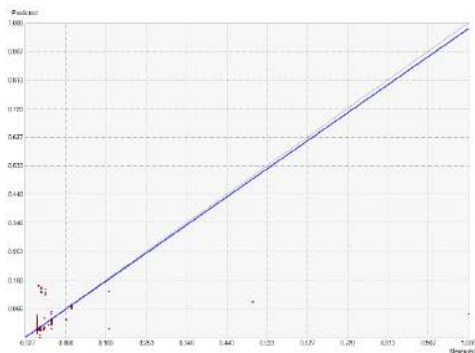
Circular



Spherical

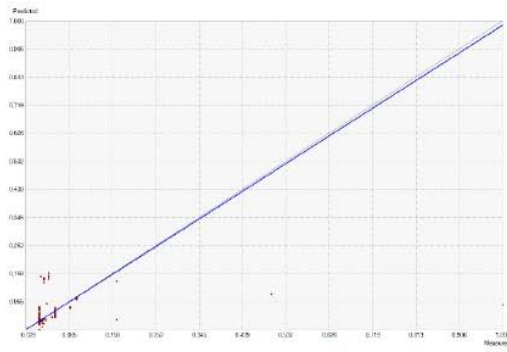


Exponential

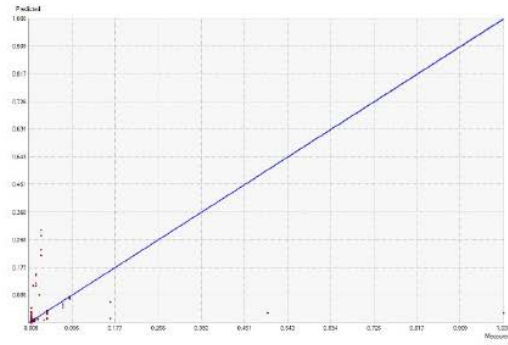


Gaussian

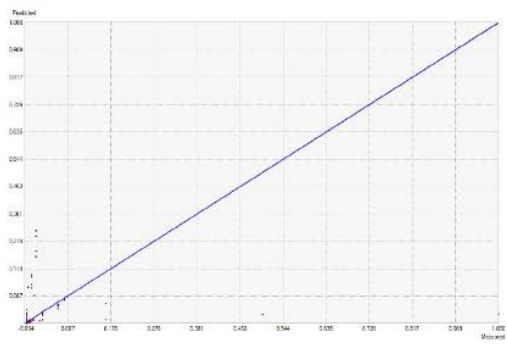
MAR



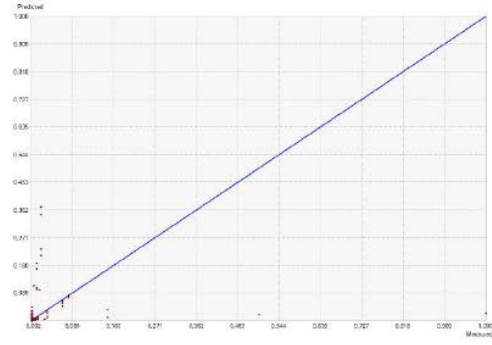
Stable



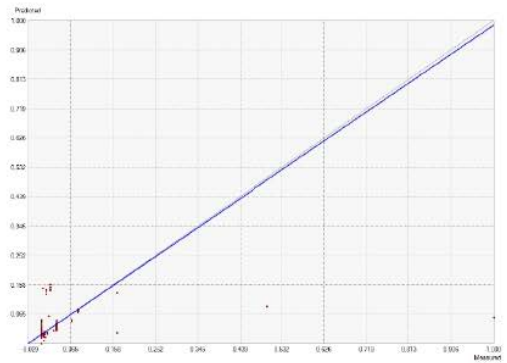
Circular



Spherical

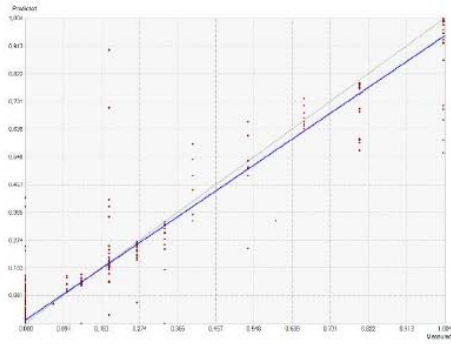


Exponential

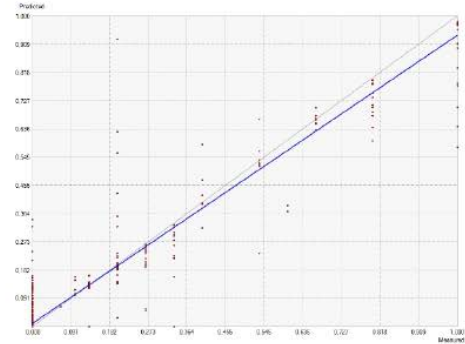


Gaussian

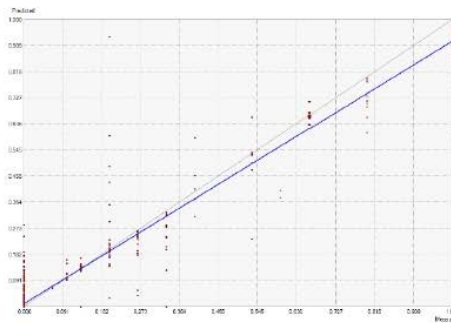
MAY/JUN



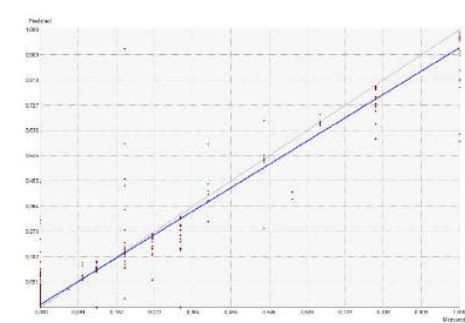
Stable



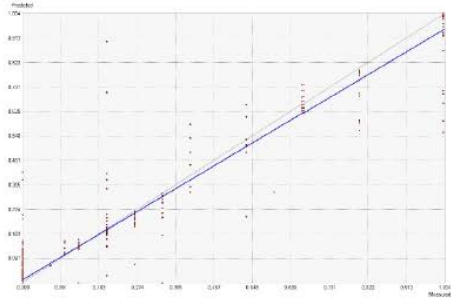
Circular



Spherical

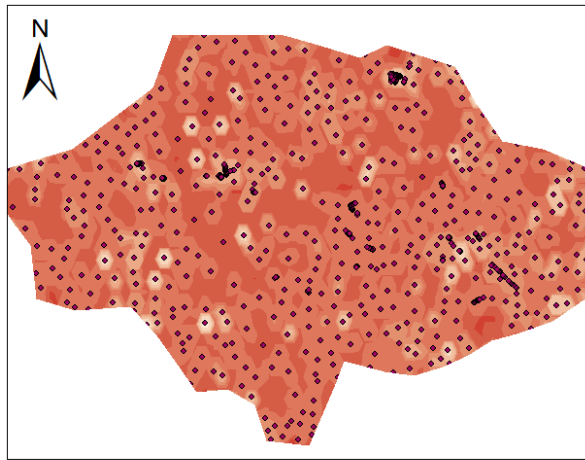


Exponential

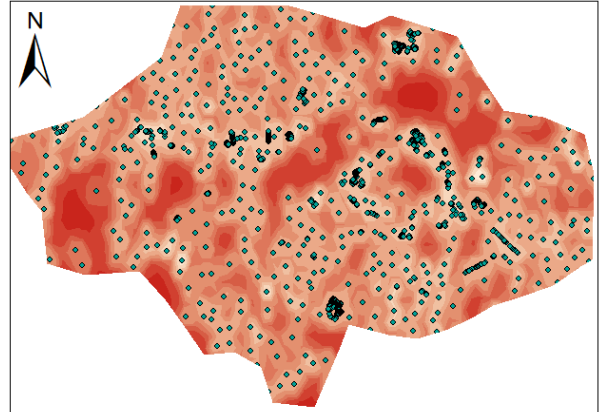
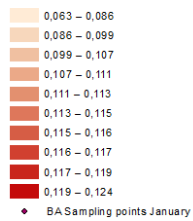


Gaussian

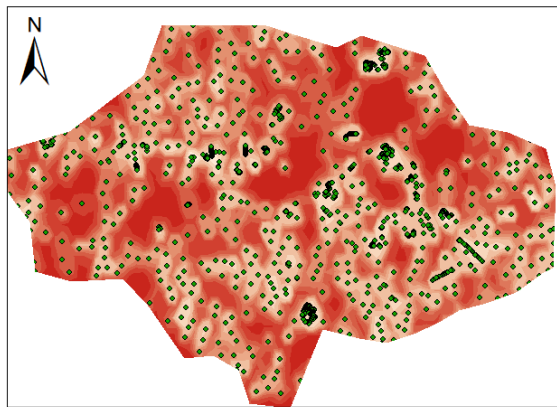
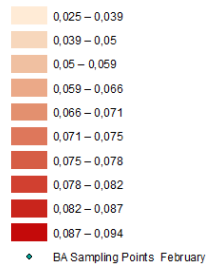
Prediction Standard Error Maps for Badajoz



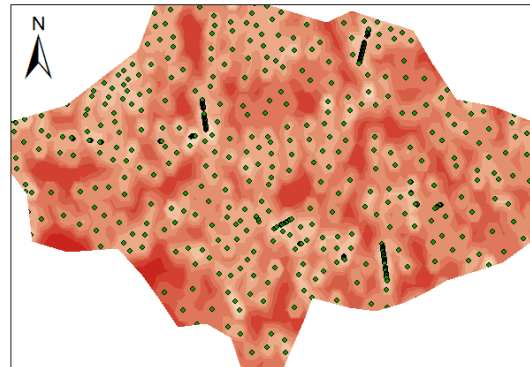
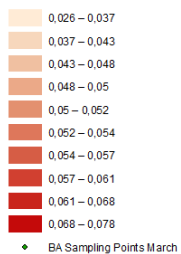
Prediction Standard Error Map



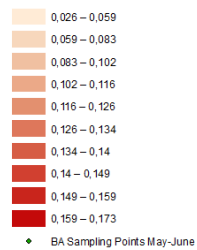
Prediction Standard Error Map



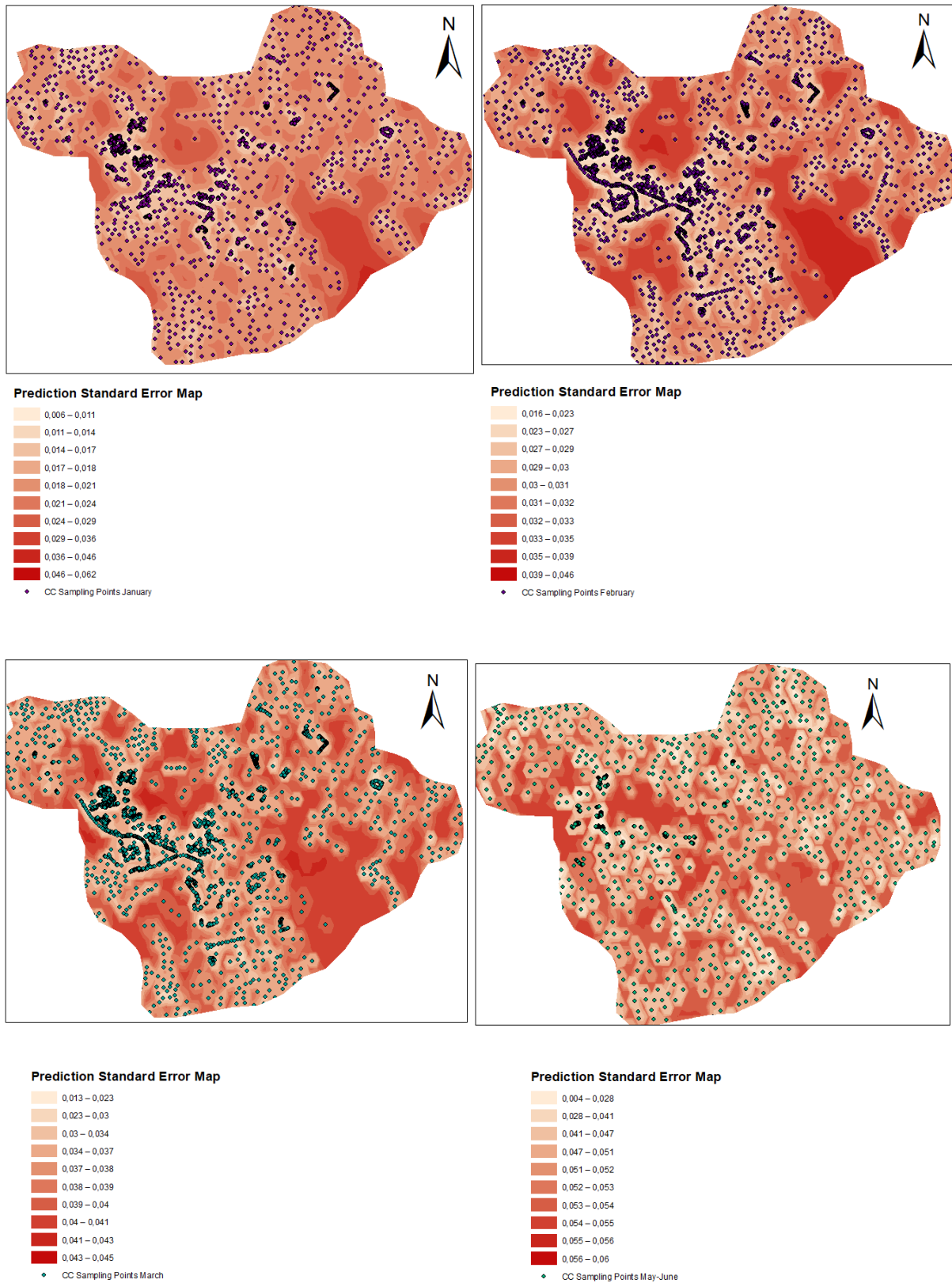
Prediction Standard Error Map



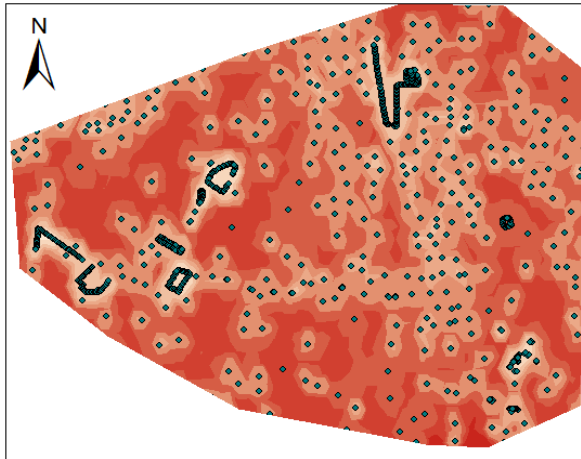
Prediction Standard Error Map



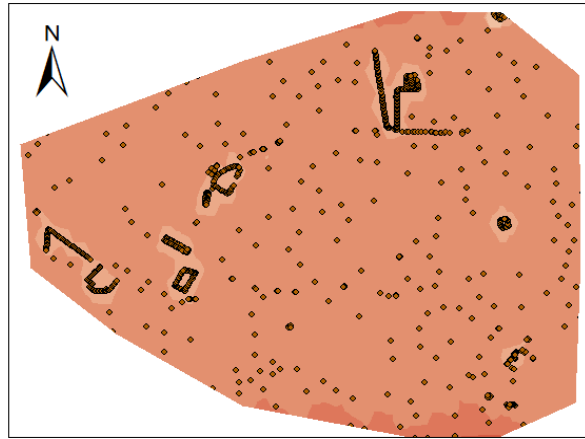
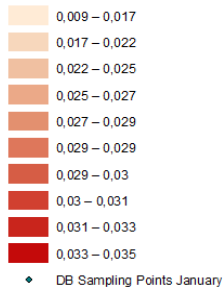
Prediction Standard Error Maps for Cáceres



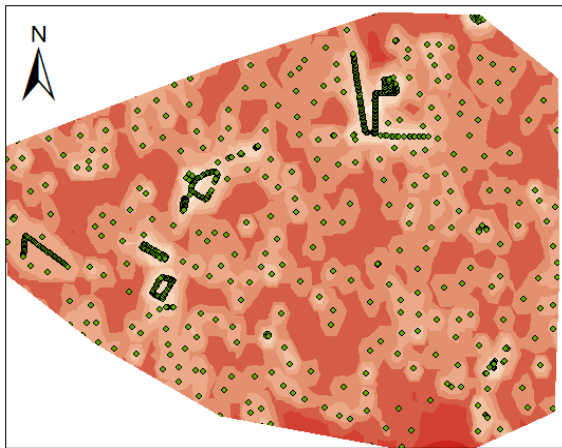
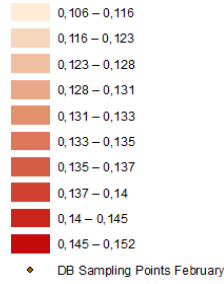
Prediction Standard Error Maps for Don Benito



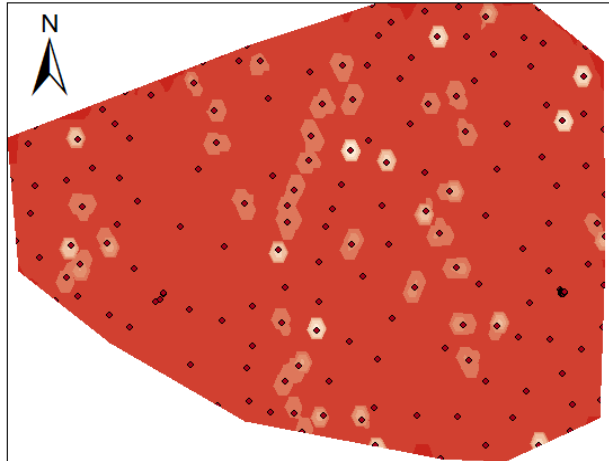
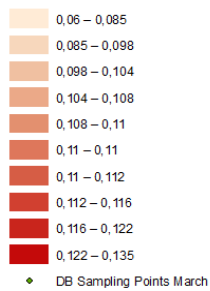
Prediction Standard Error Map



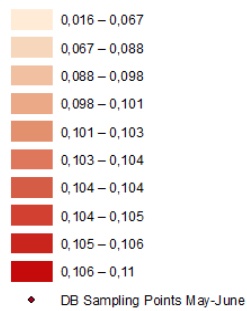
Prediction Standard Error Map



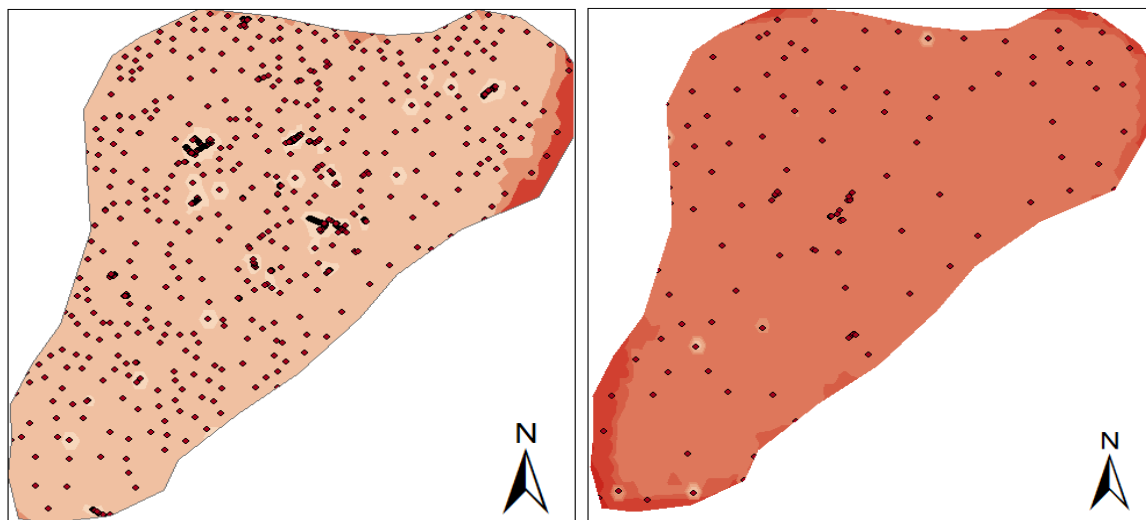
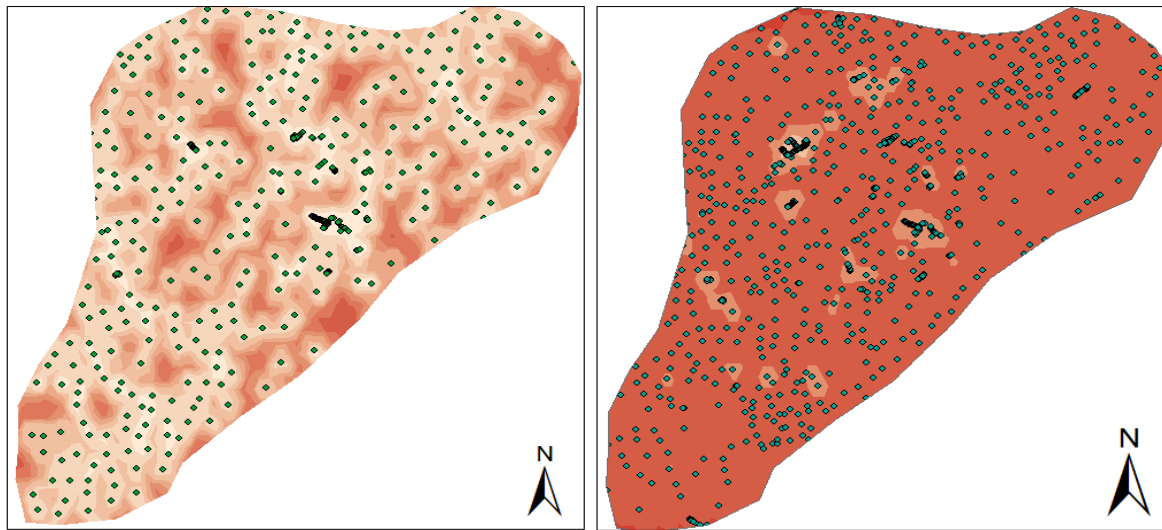
Prediction Standard Error Map



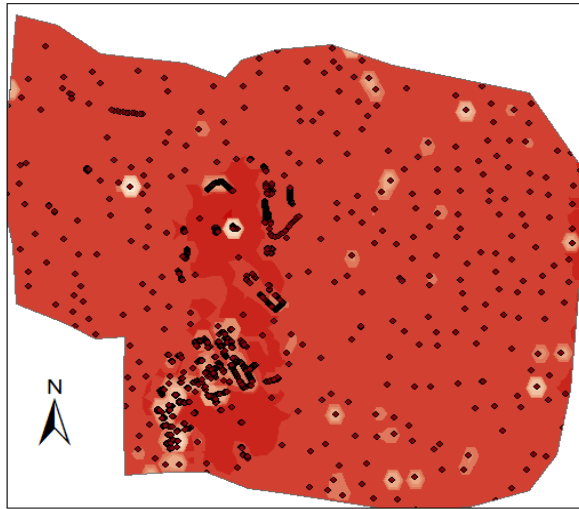
Prediction Standard Error Map



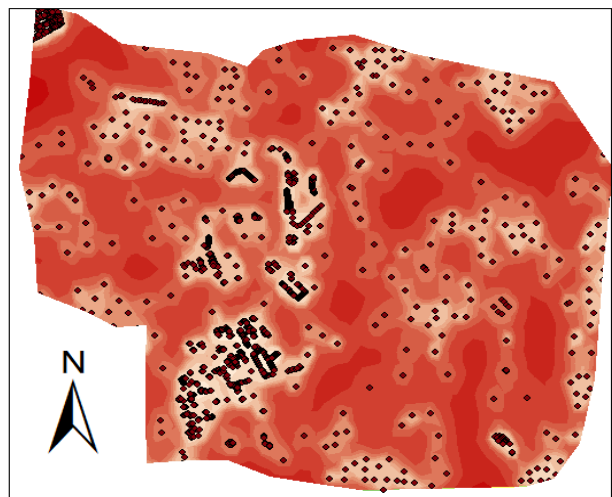
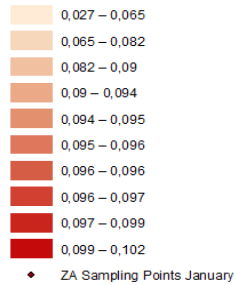
Prediction Standard Error Maps for Plasencia



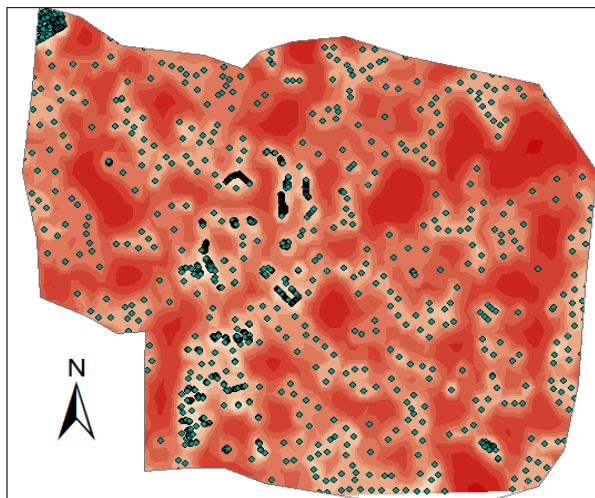
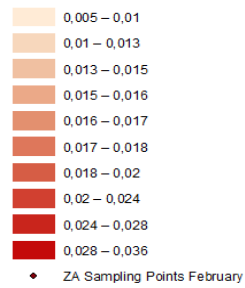
Prediction Standard Error Maps for Zafra



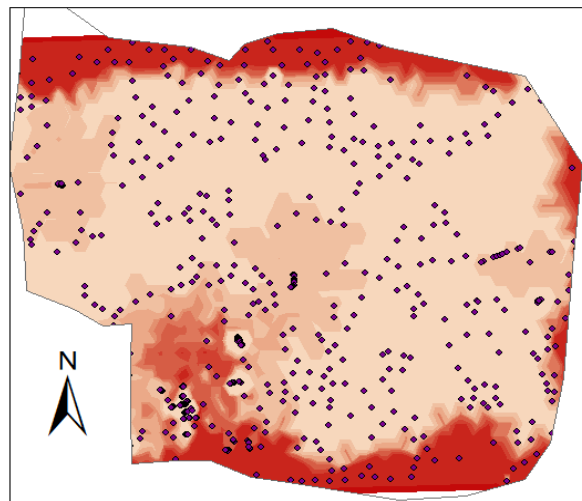
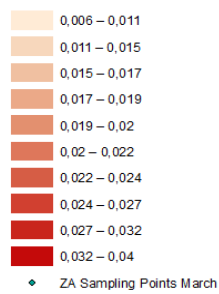
Prediction Standard Error Map



Prediction Standard Error Map



Prediction Standard Error Map



Prediction Standard Error Map

